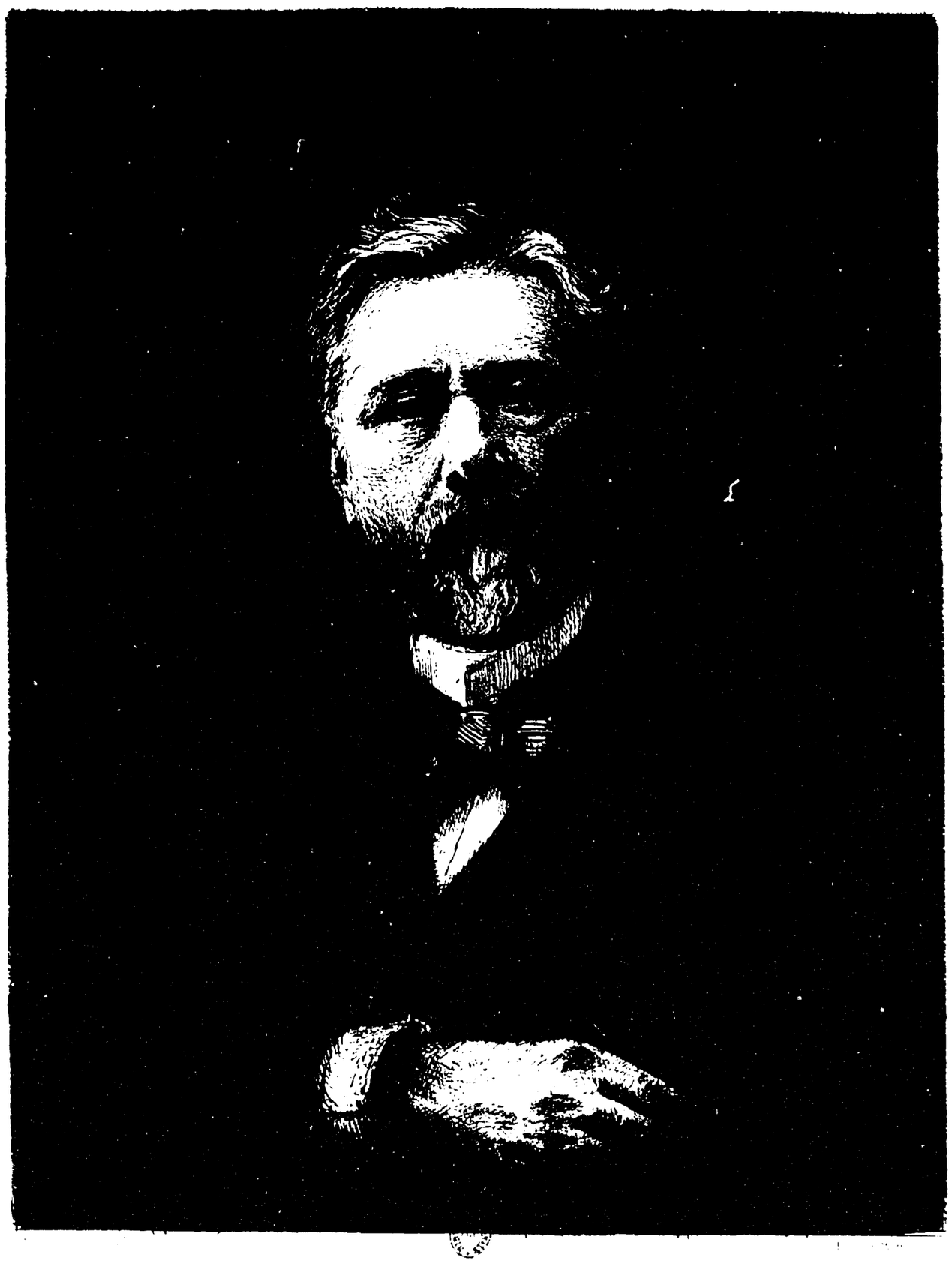


G. Eiffel

Hommage de
G. Eiffel

LA TOUR

BIBLIOTHÈQUE NATIONALE
RF
IMPRIMÉS

DE

TROIS CENTS MÈTRES

Gr. fol V
749

IL A ÉTÉ TIRÉ DE CET OUVRAGE

5oo Exemplaires sur papier vélin, numérotés :

Exemplaire N° 96

G. EIFFEL

Officier de la Légion d'honneur,
Ancien Président de la Société des Ingénieurs civils de France.

LA TOUR

DE

TROIS CENTS MÈTRES

BIBLIOTHÈQUE NATIONALE R.F. IMPRIMÉS

DON. N° 94419

TEXTE

PARIS

SOCIÉTÉ DES IMPRIMERIES LEMERCIER

44, rue Vercingétorix

—

M D CCCC

A MES COLLABORATEURS

CET OUVRAGE EST DÉDIÉ

G. E.

PERSONNEL DE LA MAISON EIFFEL

BIBLIOTHÈQUE NATIONALE IMPRIMÉS. V P

AYANT PRIS PART A LA CONSTRUCTION DE LA TOUR

BUREAUX DE LEVALLOIS-PERRET

M. J.-B. Gobert.
M. Nouguier.

BUREAU DES ÉTUDES

M. Kœchlin (M.).

MM. Bezout, Bourdon, Dantzig, Deniau, Dumoulin, Gaillardon, Gré, Guyon, Henriet, Kœchlin (H.), Le Bouvier, Levaire, Michaut (O.), Michel, Morel (R.), Morel (E.), Mijuin, Pennamen, Rouxel, de Seilhac, Schœngrun, Tavel.

BUREAU DES DESSINS D'EXÉCUTION

M. Pluot.

MM. Beaubrun, Bordet, Caucé, Chabalier, Court, Derien, Durand, Genaille, Godeberge, Legent, Mareschal, Morel (E.), Peltier, Salleyrettes, Schlesser, Stiennon, Vildé.

BUREAU D'ARCHITECTURE

M. Sauvestre.

MM. Delannoy, Mandar, Menouillard, Rouillard, Sénèque.

SECRÉTARIAT, COMPTABILITÉ ET CAISSE

M. Collin.

MM. Anquetin, Bohn, Bouet, Bourget, Buynand, Fessard (F.), Fessard (G.), Fourneau, Munier, Quérité (Ch.), Thiriot.

BUREAUX DE PARIS

M. Salles.
M. Puig.

BUREAU DES ÉTUDES

M. Ansaloni.

MM. Bente, Bouet, Finet, Julin, Lallier, Roger, Roussel.

SECRÉTARIAT, COMPTABILITÉ ET CAISSE

MM. de l'Argentière et Petit.

MM. Baziret, Butticaz (L.), Butticaz (E.), Chirouze, Devaux, Le Brun, Mattei, Renault, Talot, de Wever.

ATELIERS

M. Létourneau.
MM. Gagnot et Pentecote.

MM. Bachelot, Guénard, Landeau, Maimbourg, Malaszkiewicz.

MM. Anciaux, André, Bettinger, Bichet, Bignon, Boscus, Boule, Bunouf, Cavoit, Cerveau, Chemidlin, Choblet, Clément, Combe, Compoint, Coupé, Cuny (père), Cuny (fils), Deckert (père), Deckert (fils), Denizot, Derrien, Deveaux, Develay (père), Develay (aîné), Develay (jeune), Fleuret, Froideveaux, Georges, Gigant, Gille, Goupil, Gourgeon, Guillemin, Ginther, Guiot, Hazewer, Henneckens, Herouard, Hippy, Hitzel, Hocque (G.), Huc, Imbert, Jarry, Jeager, Laborie, Lamblet (fils), Lardé, Lasgoutte, Lataillade, Leblond, Lecœur, Léonard, Leroux (aîné), Leroux (jeune), Leroy (père), Leroy (fils), Lesage, Letang, Locatelli, Manini, Marceau (père), Marceau (fils), Marceau (L.), Marceau (T.), Maréchal, Martel, Martin, Mauroy, Meyer, Meyer (P.), Morel, Morvaille, Mouteau, Noël, Panozzo, Pardon, Patry, Pavy, Pernet, Pinel, Ponsard, Pringuez, Quin, Ragot, Ratazzi, Robert, Roblot (fils), Roché, Stacoffe, Thiry, Thomas, Thomelin, Tonneaux, Tremblay, Truchot, Veronèsi.

MAGASINS

MM. Blondeaux, Janssens, Leroy, Quérité (O.), Sotty.

SERVICE DES RÉCEPTIONS AUX USINES

M. Holfeld.

MM. Adam, Budin, Dupieux, Leclerc, Lefebvre.

GARÇONS DE BUREAU

MM. Damiens, Lainé (D.), Lainé (V.), Michaud, Munioz.

CHANTIERS

FONDATIONS ET MAÇONNERIES

M. Martin.
M. Saint-Martin.

MONTAGE DE LA PARTIE MÉTALLIQUE

M. Compagnon.
M. Milon.

MM. Balans, Gaujarenques, Girard (L.), Guellec, Léger, Petitcuenot, Quéleux.

MM. Alalinarde, Baudrand (L.), Caillat, Calvi, Dieuzaide, Duflos, Girard, Guilloux, Gouet, Jaillet, Julia, Lanfranchi, Laugé, Mandet, Menu, Milhorat, Soret.

MM. Alletru, André, Bartoloméo, Baudrand (A.), Bauducel, Bastien, Bèchon, Beffarat, Berthet, Besson, Boissy, Bories, Boué, Brignon, Bruyelle, Calmels (S.), Calmels (H.), Calzia (A), Calzia (J.), Cambours, Carle, Caussadette, Chambrin, Charpentier, Chassang, Coutanceau, Dalby, Daste, Daydé, Demon, Diziain, Dumontel, Echaubard, Fantout, Février, Fougeroux, Georgin, Gourdelier, Gourio, Granjard, Guy, Hureaux, Jambu, Ladouce, Lalande, Lamarque, Larivain, Latournerie, Lebayle, Legoubey, Lépine, Levrat, Lioret (A.), Lioret (G.), Maguin, Malochet, Marcel (A.), Marcel (E.), Massin, Mincel, Miramand, Mirasson, Moireau, Moscati, Moyne, Nègre, Nicolle (E.), Nicolle (L.), Pagès, Paillardan, Pallas, Parant, Paris, Peynard, Pomiers, Roche, Rochefort, Rondeel, Roumier, Rous, Ruffier, Sauvat, Scagliotti, Sempé, Téron (A.), Téron (B.), Téron (P.), Thiébaut, Tisserand, Touzi, Valette, Vidal (J.), Vidal (L.).

TABLE DES MATIÈRES

BIBLIOTHÈQUE NATIONALE R.F. IMPRIMÉS.

PREMIÈRE PARTIE

ORIGINES DE LA TOUR ET PRINCIPES DE L'EXÉCUTION

Paragraphes		Pages
1.	— Projets antérieurs.	1
2.	— Monument de Washington.	2
3.	— Conclusion en faveur du métal.	2
4.	— Considérations générales sur les piles métalliques.	3
5.	— Avant-projet de la Tour actuelle.	4
6.	— Présentation et approbation des projets.	5
7.	— Traité définitif.	6
8.	— Protestation des artistes.	6
9.	— Autres objections contre la Tour et son utilité.	9
10.	— Choix de l'emplacement définitif de la Tour.	11
11.	— Esquisse générale de la Tour.	12

DEUXIÈME PARTIE

CALCULS ET DESCRIPTION DE L'OSSATURE

CHAPITRE Ier

COMPOSITION DES ÉLÉMENTS DE LA TOUR

1.	— Division en panneaux et sections.	15
2.	— Sections des arbalétriers et des treillis.	15

CHAPITRE II

EFFETS DES CHARGES VERTICALES

1.	— Détermination des charges verticales.	17
2.	— Observations sur le poids de la partie métallique.	20
3.	— Charges verticales agissant sur les sections.	21
4.	— Calcul de la partie supérieure.	22
5.	— Calcul de la partie inférieure. Méthode employée.	23
6.	— Partie inférieure. Calculs numériques.	26

1950

CHAPITRE III

EFFORTS DUS AU VENT

Paragraphes — Pages

1. — Principe de la construction. 29
2. — Intensité du vent. 29
3. — Surfaces offertes au vent. 30
4. — Division en éléments. 31
5. — Surface des éléments, efforts du vent par élément et moments de renversement correspondants. 31
6. — Calculs des efforts moléculaires dus au vent dans la partie supérieure. 32
7. — Calcul des efforts moléculaires dus au vent dans la partie inférieure. 35
8. — Hypothèse d'un vent agissant dans une direction quelconque. 42

CHAPITRE IV

COEFFICIENTS DE TRAVAIL MAXIMUM RÉSULTANT DES CHARGES ET DU VENT

1. — Arbalétriers. 44
2. — Treillis. 45
3. — Nouvelle hypothèse d'un vent variant de 100 à 300 kg. 45

CHAPITRE V

CALCUL DES CEINTURES ET DES POUTRES TRANSVERSALES DU PREMIER ET DU DEUXIÈME ÉTAGE. POUTRES DIAGONALES SUPÉRIEURES

1. — Ceintures du premier étage. 48
2. — Poutres transversales du premier étage. 50
3. — Ceintures du second étage. 52
4. — Poutres transversales D. 54
5. — Poutres diagonales supérieures. 55

CHAPITRE VI

CALCUL DES POUTRES DES PLANCHERS DU TROISIÈME ÉTAGE ET DE LA PLATE-FORME INTERMÉDIAIRE. — POUTRES D'ASCENSEURS

1. — Plancher du troisième étage. 60
2. — Plate-forme intermédiaire. 62
3. — Poutres d'ascenseur. 65

CHAPITRE VII

INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE. — STABILITÉ. — FONDATIONS ET FLÈCHE

1. — Influence de la température. 66
2. — Stabilité. 67
3. — Charges sur les maçonneries et sur le sol de fondations. 67
4. — Calcul de la flèche produite par le vent. 68

Appendice du chapitre VII. Calcul des surfaces exposées au vent. 71

CHAPITRE VIII

DESCRIPTION DE L'OSSATURE

1. — Appuis des arbalétriers. 75
2. — Montants jusqu'au 1er étage. 75
3. — Panneau 5 et poutres du 1er étage. 76
4. — Panneaux 6 à 10. 77
5. — Plancher du 2e étage. 77
6. — Panneaux 12 à 29. 77

Paragraphes — Pages

7. — Plancher intermédiaire. 78
8. — Panneau 29. 78
9. — Plancher du 3e étage. 78
10. — Quatrième plate-forme et étage réservé. 79
11. — Grandes poutres diagonales et cintres du campanile. 79
12. — Phare. 79
13. — Poutres de l'arc et arcs décoratifs. 80
14. — Poutres d'ascenseurs. 80
15. — Escaliers. 81
Table spéciale détaillée des chapitres de la deuxième partie. 82

TROISIÈME PARTIE

EXÉCUTION DES TRAVAUX

CHAPITRE I

FONDATIONS ET SOUBASSEMENTS DES PILES

1. — Étude du sous-sol et choix de l'emplacement définitif. 85
2. — Fondation de la pile 2. 86
3. — Fondation de la pile 3. 88
4. — Puits de sondage des piles 1 et 4. 88
5. — Fondation de la pile 4. 89
6. — Fondation de la pile 1. 93
7. — Ensemble des fondations. 94
8. — Pression dans les maçonneries et sur le sol. 94
9. — Soubassements. 95
10. — Prix de revient des fondations. 96

CHAPITRE II

PARTIE MÉTALLIQUE

1. — Travail à l'atelier. 100
2. — Appuis et verins hydrauliques. 101
3. — Montage des deux premiers étages. 102
4. — Pylônes de butée. 103
5. — Boîtes à sable. 104
6. — Grue de montage. 105
7. — Montage des poutres horizontales du premier étage. 107
8. — Id. du premier au deuxième étage. 109
9. — Id. du deuxième au troisième étage. 109
10. — Dates relatives aux diverses phases du montage. 112
11. — Rivure. 113
12. — Organisation du chantier. 113
13. — Personnel du chantier. 114
14. — Détails complémentaires sur la manœuvre des grues. 115
15. — Échafaudages de montage et de rivure. 116
16. — Détails divers du montage. 117
17. — Montage des escaliers et des ascenseurs. 118
18. — Id. des restaurants. 118
19. — Cantine. 118
20. — Grèves. 119
21. — Prix des heures de travail. 120
22. — Tableau des heures de travail. 120

Paragraphes — Pages

23. — Dépense totale de la main-d'œuvre du 11 juin 1887 au 30 juin 1889. 121
24. — Main-d'œuvre des travaux spéciaux. 121
25. — Id. du montage de l'ossature. 123
26. — Appointements des employés du chantier. 124
27. — Matières. 124

QUATRIÈME PARTIE

ORGANES MÉCANIQUES

CHAPITRE I

Dispositions générales. 125

CHAPITRE II

ASCENSEURS HYDRAULIQUES SYSTÈME OTIS

1. — Principe de l'appareil. 127
2. — Description de l'ascenseur. 128
3. — Fabrication et résistance des câbles. 139
4. — Marche de l'appareil. 141
5. — Rendement. 142
6. — Équilibre des forces mises en jeu abstraction faite des résistances passives. 143

ÉTUDE DYNAMIQUE DE L'ASCENSEUR

1. — Tensions exercées par le contrepoids sur la cabine. 146
2. — Id. dans le garant du moufle moteur. 148
3. — Effort moteur. 150
4. — Résumé des résistances passives pendant la montée de la cabine pleine. 151
5. — Expériences dynamiques et manométriques. 151
6. — Examen spécial de l'expérience n° 1. 153

CHAPITRE III

ASCENSEURS A PISTONS ARTICULÉS SYSTÈME ROUX, COMBALUZIER ET LEPAPE

1. — Principe de l'appareil. 155
2. — Description détaillée. 156
3. — Fonctionnement. 161
4. — Rendement. 161

CALCULS DE L'ASCENSEUR

1. — Détermination de la pression d'eau effective sur les plongeurs. 163
2. — Détermination des efforts à exercer sur le circuit dans les différentes hypothèses de surcharge de la cabine. 163

CHAPITRE IV

ASCENSEUR VERTICAL, SYSTÈME EDOUX

1. — Principe de l'appareil. 171
2. — Description détaillée. 172
3. — Fonctionnement et manœuvre. 178

Paragraphes — Pages

4. — Montage. 179
5. — Nombre de voyageurs transportés et rendement. 181
6. — Vitesses et pressions observées. 181
7. — Nouvelles expériences de vitesses et de pressions. 183
8. — Équilibrage du système. 184

CALCULS DE L'ASCENSEUR

1. — Hauteurs de chute. 187
2. — Détermination du diamètre et du poids du piston. 187
3. — Pertes de charge. 187
4. — Détermination des résistances passives. 188
5. — Équilibre du système. 189
6. — Calculs de résistance des pièces principales. 191
7. — — du parachute hélicoïdal. 192
8. — Contrat de fourniture. 192

CHAPITRE V

ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE ET PHARE

1. — Moteurs et dynamos. 193
2. — Distribution. 193
3. — Canalisation. 194
4. — Projecteurs. 195
5. — Phare. 196

CHAPITRE VI

MACHINES ET CHAUDIÈRES

1. — Quantité d'eau à fournir aux ascenseurs du 1er et du 2e étage. 199
2. — Pompes Quillacq. 199
3. — — Worthington. 200
4. — Machines diverses. 201
5. — Générateurs Collet-Niclausse. 201
6. — Conduite de fumée et cheminée. 202
7. — Soute à charbon. 202
8. — Alimentation d'eau. 202

CHAPITRE VII

POIDS ET PRIX DE REVIENT

1. — Ascenseurs Otis. 203
2. — — Roux, Combaluzier et Lepape. 205
3. — — Edoux. 206
4. — Machinerie. 207
5. — Phare et service électrique. 208

CINQUIÈME PARTIE

DÉPENSES ET TRAVAUX COMPLÉMENTAIRES. — EXPLOITATION

CHAPITRE I

Paragraphes — Pages

1. — Fers et fontes de la superstructure. 210

CHAPITRE II

PLATES-FORMES

1. — Plate-forme du 1er étage. 212
2. — — du 2e étage. 214
3. — — du 3e étage, pavillon réservé et galerie supérieure. 215
4. — Prix de revient des plates-formes. 216

CHAPITRE III

PEINTURE DES FERS ET FONTES

1. — Exécution du travail. 222
2. — Dépenses. 223

CHAPITRE IV

DÉPENSES D'ENSEMBLE ET PRIX DE REVIENT TOTAL DE LA TOUR

1. — Dépenses d'ensemble. 224
2. — Prix de revient total de la Tour. 225

CHAPITRE V

EXPLOITATION

1. — Formation de la Société de la Tour Eiffel. 226
2. — Recettes de l'Exploitation. 227
3. — Frais généraux de l'Exploitation. 230
4. — Exploitation de 1890 à 1898. 232

SIXIÈME PARTIE

APPLICATIONS SCIENTIFIQUES ET DIVERSES

CHAPITRE I

VISIBILITÉ. TÉLÉPHOTOGRAPHIE ET TÉLÉGRAPHIE OPTIQUE

1. — Visibilité. 235
2. — Téléphotographie. 238
3. — Télégraphie optique. 239

CHAPITRE II

MÉTÉOROLOGIE

Paragraphes — Pages

1. — Avant-propos. 240
2. — Premières observations des années 1889 et 1890. 240
3. — Observations de 1890 à 1894. 256
4. — — détaillées des températures de 1894. 273
5. — — des températures de 1890 à 1893. 276
6. — — spéciales de températures et de vents. 277
7. — Travaux de M. Langley. 282

CHAPITRE III

PHÉNOMÈNES PHYSIQUES

I. Électricité atmosphérique.

1. — Conductibilité électrique de la Tour et de ses prises de terre. 285
2. — Coups de foudre. 286
3. — Variation diurne de l'électricité atmosphérique. 286

II. Résistance de l'air et pression du vent.

1. — Recherches expérimentales sur la chute des corps et sur la résistance de l'air à leur mouvement. 287
2. — Blocs de renversement. 289

III. Déplacements du sommet mesurés par visées directes.

1. — Déplacements dus au vent. 291
2. — — dus à la température. 292

IV. Repérage du sommet par les méthodes géodésiques. 293

V. Manomètre a air libre pour les hautes pressions. 295

VI. Télégraphie sans fil. 297

VII. Aéronautique. 297

VIII. Origine tellurique des raies de l'oxygène dans le spectre solaire. 298

IX. Étude de l'absorption atmosphérique des radiations visibles par l'observation spectrale des faisceaux électriques de la Tour Eiffel en 1889, par M. A. Cornu. 300

CHAPITRE IV

EFFETS PHYSIOLOGIQUES DE L'ASCENSION A LA TOUR EIFFEL

Modification dans l'activité des échanges respiratoires de l'organisme. Travail mécanique dans la montée à pied.

Par le Dr A. Henocque

Introduction. 303
1. — Travail mécanique dû à l'ascension à pied. 303
2. — De l'activité de réduction de l'oxyhemoglobine. 306
3. — Modifications de l'activité de réduction de l'oxyhemoglobine dans les ascensions de la Tour Eiffel. 306
4. — Modification du pouls. 309
5. — Tension vasculaire. 309
6. — Modification de la respiration. 309

SEPTIÈME PARTIE

LA TOUR PENDANT L'EXPOSITION DE 1889

1. — Pose du drapeau du sommet. 311
2. — Médaille commémorative. 313
3. — Discours prononcés à la « Conférence Scientia » le 13 avril 1889. 314
4. — Embrasements et illuminations. 320
5. — Bureau postal de la 3e plate-forme. 321

Paragraphes — Pages

6. — Imprimerie du *Figaro* de la Tour Eiffel. 321
7. — Principales visites faites au sommet. 322
8. — Tour de Wembley-Park. 322

HUITIÈME PARTIE

MODIFICATIONS EN VUE DE L'EXPOSITION DE 1900

CHAPITRE I

PLATES-FORMES

1. — Traité avec l'Exposition. 325
2. — Première plate-forme. 325
3. — Deuxième plate-forme. 326
4. — Troisième plate-forme. 327

CHAPITRE II

DISPOSITIONS GENERALES DES ASCENSEURS ET ESCALIERS

1. — Dispositions antérieures. 329
2. — — nouvelles. 330

CHAPITRE III

ASCENSEURS SYSTÈME FIVES-LILLE

1. — Dispositions générales. 332
2. — Organes principaux. 333
3. — Fonctionnement de l'appareil. 342
4. — Rendement et marche de l'appareil. 343
5. — Résumé des données numériques et des calculs dynamiques. 344
6. — Résumé des poids de l'appareil. 345

CHAPITRE IV

ASCENSEUR OTIS DU PILIER NORD

1. — Modifications apportées à l'ascenseur. 348
2. — Marche et rendement de l'ascenseur. 350
3. — Résumé des données numériques et des calculs dynamiques. 350

CHAPITRE V

ASCENSEUR VERTICAL

1. — Modifications des cabines et de la distribution. 352
2. — Frein de sûreté hydraulique. 353
3. — Calculs du frein de sûreté hydraulique. 355
4. — Résultats des expériences comparatives pour l'ancienne et la nouvelle installation. 357
5. — Résumé des principales données relatives à l'ascenseur transformé, et résumé des calculs dynamiques. 358

CHAPITRE VI

ESCALIERS

1. — Escaliers des piliers Est et Ouest. 361
2. — Escalier du pilier Sud. 361

CHAPITRE VII

MACHINES ET CHAUDIÈRES

Paragraphes		Pages
1.	— Pompes Worthington.	363
2.	— Groupe électrogène.	365
3.	— Condenseurs.	365
4.	— Générateurs.	365
5.	— Résumé de la puissance totale de l'installation mécanique.	366

CHAPITRE VIII

ECLAIRAGE ÉLECTRIQUE

1.	— Éclairage.	367
2.	— Illuminations.	367
3.	— Embrasement	368
4.	— Puissance nécessaire pour alimenter l'installation.	368

CONCLUSION

SIGNATURES ET AUTOGRAPHES

REPRODUCTION DE SIGNATURES ET AUTOGRAPHES EXTRAITS DES LIVRES DES VISITEURS DE LA TOUR

APPENDICE

NOTICE SUR LES TRAVAUX DE M. G. EIFFEL

ET LES PRINCIPAUX OUVRAGES EXÉCUTES PAR SES ÉTABLISSEMENTS (1867 A 1890)

BIBLIOTHÈQUE NATIONALE R.F. IMPRIMÉS

PREMIÈRE PARTIE

ORIGINES DE LA TOUR

&

PRINCIPES DE L'EXÉCUTION

BIBLIOTHÈQUE NATIONALE R.F. IMPRIMÉS.

§ 1. — Projets antérieurs.

Sans remonter à la Tour de Babel, on peut observer que l'idée même de la construction d'une tour de très grande hauteur a depuis longtemps hanté l'imagination des hommes.

Cette sorte de victoire sur cette terrible loi de la pesanteur qui attache l'homme au sol lui a toujours paru un symbole de la force et des difficultés vaincues.

Pour ne parler que des faits de notre siècle, la *Tour de mille pieds* qui dépassait par sa hauteur le double de celle que les monuments les plus élevés construits jusqu'alors avaient permis d'atteindre, s'était posée dans l'esprit des ingénieurs Anglais et Américains comme un problème bien tentant à résoudre. L'emploi nouveau du métal dans la construction permettait d'ailleurs de l'aborder avec chance de succès.

En effet les ressources de la maçonnerie, au point de vue de la construction d'un édifice très élevé, sont fort limitées. Dès que l'on aborde ces grandes hauteurs de mille pieds, les pressions deviennent tellement considérables que l'on se heurte à des impossibilités pratiques qui rejettent l'édifice projeté au rang des chimères irréalisables.

Mais il n'en est pas de même avec l'emploi de la fonte, du fer ou de l'acier, que ce siècle a vu naître comme matériaux de constructions, et qui a pris un développement si considérable. Les résistances de ces métaux se meuvent dans un champ beaucoup plus étendu, et leurs ressources sont toutes différentes.

Aussi, dès la première apparition de leur emploi dans la construction, l'ingénieur anglais Trevithick, en 1833, proposa d'ériger une immense colonne en fonte ajourée de 1.000 pieds de hauteur (304m,80), ayant 30 mètres à la base et 3m,60 au sommet. Mais ce projet fort peu étudié ne reçut aucun commencement d'exécution.

La première étude sérieuse qui suivit eut lieu en 1874, à l'occasion de l'Exposition de Philadelphie. Il fut parlé plus que jamais de la Tour de mille pieds, dont le projet (décrit dans la Revue scientifique « La Nature ») avait été établi par deux ingénieurs américains distingués, MM. Clarke et Reeves. Elle était constituée par un cylindre en fer de 9 mètres de diamètre maintenu par des haubans métalliques disposés sur tout son pourtour et venant se rattacher à une base de 45 mètres de diamètre. Malgré le bruit fait autour de ce projet et le génie novateur du Nouveau-Monde, soit que la construction parût trop hardie, soit que les capitaux eussent manqué, on recula au dernier moment devant son exécution; mais cette conception était déjà entrée dans le domaine de l'ingénieur.

En 1881, M. Sébillot revint d'Amérique avec le dessin d'une Tour en fer de 300 mètres, surmontée d'un foyer électrique pour l'éclairage de Paris, projet sur le caractère pratique duquel il n'y a pas à insister.

MM. Bourdais et Sébillot reprirent en commun l'idée de cet édifice, mais leur *Tour soleil* était cette fois en maçonnerie. Ce projet soulevait de nombreuses objections qu'il est inutile de rappeler et qui s'appliquent à une construction quelconque de ce genre.

§ 2. — Monument de Washington.

Pour donner une idée des difficultés que présente, d'une manière générale, l'exécution d'une Tour en maçonnerie, on peut citer le grand obélisque en pierre connu sous le nom de « Monument de Washington » inauguré en 1885 et qui était à cette époque le plus haut monument du monde (depuis on a construit à Turin la Tour Môle Antonelliana qui a sensiblement la même hauteur.)

Cet ouvrage, construit entièrement en granit avec revêtement en marbre, a une hauteur de 169m,25. Il est carré du haut en bas; sa base au niveau des fondations a 16m,75 de côté; au-dessous du pyramidion qui le surmonte, ce côté n'a plus que 10m,50. Le pyramidion lui-même a 16m,86 de hauteur. Cet obélisque est évidé à l'intérieur par un espace rectangulaire tel que l'épaisseur des murs au sommet est de 0m,50 et à la base de 4m,50. Son fruit extérieur est de 3m,15 sur une hauteur de 152m,40, soit environ 0m,02 par mètre. Le vide intérieur reçoit un ascenseur à vapeur, qui a servi à l'élévation des matériaux et sert maintenant à celle des visiteurs.

Le poids de la construction au-dessus des fondations est de 45,000 tonnes qui, réparties sur une base de 223 mètres carrés, donnent un coefficient à la compression de 20 kilogs par centimètre carré.

Si l'on se rend compte de l'effet d'un vent de 300 kilogs sur cette construction, le coefficient de travail par l'effet de ce vent s'élève à 26kg,5 par centimètre carré.

Telle est la limite que même avec des matériaux de choix et une exécution particulièrement soignée, les ingénieurs américains, qui ne passent pas pour manquer de hardiesse, n'ont pas osé dépasser, et ils ont eu pour cela de bonnes raisons.

Le premier projet, dont l'exécution avait été commencée en 1848, comportait une pyramide de 600 pieds, soit 183 mètres de hauteur, entourée d'un Panthéon avec une colonnade formant péristyle. Mais, quand en 1854 la pyramide fut arrivée à la hauteur de 46 mètres, on s'aperçut qu'elle s'inclinait d'une façon tellement inquiétante qu'on suspendit les travaux. Ils ne furent repris qu'en 1877; on réduisit de 100 pieds la hauteur que l'on avait assignée d'abord au monument, et on la fixa définitivement à 169 mètres, puis on reprit toute la fondation en sous-œuvre. On élargit considérablement la base en établissant au pourtour de nouveaux massifs de béton, descendus plus profondément de manière à donner un empattement total de 38 mètres, qui portait la surface des fondations de 600 mètres carrés à 1.500 mètres carrés. La pression maxima sur le lit inférieur de la fondation ne dépassait pas 6 kilogs; néanmoins il se produisit encore quelques tassements plus ou moins égaux, qui, depuis l'origine, sont d'environ 10 centimètres.

C'est seulement en 1880, qu'après de grandes difficultés vaincues, on reprit les travaux de la partie supérieure. Ils marchèrent depuis très régulièrement à raison de 30 mètres environ d'élévation par année, et l'ouvrage fut inauguré le 21 février 1885.

La dépense a dépassé 7 millions de francs. Quant au Panthéon qui devait décorer l'édifice, il a été tout à fait ajourné, en raison de la dépense considérable qu'il devait entraîner.

Malgré ce haut prix, cet édifice est d'une extrême simplicité, puisqu'il se réduit à un grand obélisque qui n'a, somme toute, que 170 mètres de hauteur.

§ 3. — Conclusion en faveur du métal.

Que deviendrait ce prix pour une pyramide de 300 mètres?

Nous avons essayé de nous en rendre compte et, en établissant une pile d'égale résistance pour un coefficient de 30 kilogs, nous sommes arrivés à un cube d'environ 70.000 mètres, non compris les fondations. Quant à celles-ci, le cube n'en était pas moindre que 38.000 mètres; soit en tout 108.000 mètres cubes.

Si l'on voulait orner cette pyramide par un Panthéon et par des décorations spéciales, ce chiffre devrait encore être augmenté dans une très grande proportion, et nous renonçons à en établir un prix même approximatif.

En résumé, la difficulté des fondations, les conséquences dangereuses qui pourraient résulter, soit des

tassements inégaux du sol (tassements qui, dans le cas d'une tour en fer, n'ont aucun inconvénient sérieux), soit des tassements inégaux des mortiers et de leur prise insuffisante au sein de ces gros massifs, les difficultés et les lenteurs de construction qu'entraînerait la mise en œuvre du cube énorme des maçonneries nécessaires, ainsi que le prix considérable de l'ouvrage, — toutes ces considérations nous ont donné la conviction qu'une tour en maçonnerie, très difficile à projeter théoriquement, présenterait en pratique des dangers et des inconvénients considérables, dont le moindre est celui d'une dépense tout à fait disproportionnée avec le but à atteindre. Le fer ou l'acier nous semble donc la seule matière capable de mener à la solution du problème. Du reste, l'Antiquité, le Moyen âge et la Renaissance ont poussé l'emploi de la pierre à ses extrêmes limites de hardiesse, et il ne semble guère possible d'aller beaucoup plus loin que nos devanciers avec les mêmes matériaux, — d'autant plus que l'art de la construction n'a pas fait de très notables progrès dans ce sens depuis bien longtemps déjà.

Voici du reste la hauteur des plus hauts monuments du monde actuellement existants :

Colonne de la place Vendôme	43 mètres.
Colonne de la Bastille	47 —
Tours de Notre-Dame de Paris	66 —
Panthéon	79 —
Capitole de Washington	93 —
Cathédrale d'Amiens	100 —
Flèche des Invalides	105 —
Dôme de Milan	109 —
Saint-Paul de Londres	110 —
Cathédrale de Chartres	113 —
Tour Saint-Michel à Bordeaux	113 —
Cathédrale d'Anvers	120 —
Saint-Pierre de Rome	132 —
Tour Saint-Étienne à Vienne	138 —
Cathédrale de Strasbourg	142 —
Pyramide de Chéops	146 —
Cathédrale de Rouen	150 —
Cathédrale de Cologne	156 —
Obélisque de Washington	169 —
Tour Môle Antonelliana à Turin	170 —

L'édifice, tel que nous le projetions avec sa hauteur inusitée, exigeait donc rationnellement une matière sinon nouvelle, mais au moins que l'industrie n'avait pas encore mise à la portée des ingénieurs et des architectes qui nous avaient précédés. Cette matière ne devait pas être la fonte qui résiste fort mal à des efforts autres que de simples compressions, ce devait être exclusivement le fer ou l'acier, par l'emploi desquels les plus difficiles problèmes de construction se résolvent si simplement, avec lesquels nous construisons couramment soit des charpentes, soit des ponts à grande portée, qui auraient paru autrefois tout à fait irréalisables.

§ 4. — Considérations générales sur les piles métalliques.

J'avais eu l'occasion dans ma carrière industrielle de faire de nombreuses études sur les piles métalliques, notamment en 1869 avec M. Nordling, ingénieur de la Compagnie d'Orléans. Je construisis, sous les ordres de cet éminent ingénieur, deux des grands viaducs de la ligne de Commentry à Gannat, ceux de la Sioule et de Neuvial.

Les piles de ces viaducs, dont la partie métallique a une hauteur maxima de 51 mètres au-dessus du soubassement en maçonnerie, étaient constituées par des colonnes en fonte, réunies par des entretoises en fer.

Je me suis attaché depuis à ce genre de construction, mais en remplaçant la fonte par le fer afin d'augmenter les garanties de solidité.

Le type de piles que j'y ai substitué consiste à former celles-ci par quatre grands caissons quadrangulaires, ouverts du côté de l'intérieur de la pile, et dans lesquels viennent s'insérer de longues barres de contreventement de section carrée, susceptibles de travailler aussi bien à la compression qu'à l'extension sous les efforts du vent.

Ce type est devenu courant et je l'ai employé à de nombreux viaducs. Parmi ceux-ci je ne citerai que le pont du Douro à Porto, — dont l'arche centrale comporte un arc métallique de 160 mètres d'ouverture et

de 42m,50 de flèche, et le viaduc de Garabit (Cantal) qui franchit la Truyère à une hauteur de 122 mètres. On sait que ce viaduc d'une longueur de 564 mètres a été établi sur le type du pont du Douro et que son arche centrale est formée par un arc parabolique de 165 mètres d'ouverture et de 57 mètres de flèche. C'est dans ce dernier ouvrage que je réalisai le type définitif de ces piles dont la hauteur atteint 61 mètres pour la partie métallique seule.

La rigidité des piles ainsi constituées est très grande, leur entretien très facile et leur ensemble a un réel caractère de force et d'élégance.

Mais si l'on veut aborder des hauteurs encore plus grandes et dépasser 100 mètres par exemple, il devient nécessaire de modifier le mode de construction. — En effet, si les pieds de la pile atteignent une largeur de 25 à 30 mètres nécessaire pour ces hauteurs, les diagonales d'entretoisement qui les réunissent prennent une telle longueur que, même établies en forme de caisson, elles deviennent d'une efficacité à peu près illusoire et en même temps leur poids devient relativement très élevé. Il y a donc grand avantage à se débarrasser complètement de ces pièces accessoires et à donner à la pile une forme telle que tous les efforts tranchants viennent se concentrer dans ses arêtes. A cet effet il y a intérêt à la réduire à quatre grands montants dégagés de tout treillis de contreventement, et réunis simplement par quelques ceintures horizontales très espacées.

S'il s'agit d'une pile supportant un tablier métallique, et si l'on ne tient compte que de l'effet du vent sur le tablier lui-même, lequel est toujours considérable par rapport à celui qui s'exerce sur la pile, il suffira, pour pouvoir supprimer les barres de contreventement des faces verticales, de faire passer les deux axes des arbalétriers par un point unique placé sur le sommet de cette pile.

Il est évident, dans ce cas, que l'effort horizontal du vent pourra se décomposer directement suivant les axes de ces arbalétriers, et que ceux-ci ne seront soumis à aucun effort tranchant.

Si, au contraire, il s'agit d'une très grande pile, telle que la Tour actuelle, dans laquelle il n'y a plus au sommet la réaction horizontale du vent sur le tablier, mais simplement l'action du vent sur la pile elle-même, les choses se passent différemment et il convient, pour supprimer l'emploi des barres de treillis, de donner aux montants une courbure telle que les tangentes à ces montants, menées en des points situés à la même hauteur, viennent toujours se rencontrer au point de passage de la résultante des actions que le vent exerce sur la partie de la pile qui se trouve au-dessus des points considérés.

Enfin, dans le cas où l'on veut tenir compte à la fois de l'action du vent sur le tablier supérieur du viaduc et de celle que subit la pile elle-même, la courbe extérieure de la pile est moins infléchie et se rapproche de la ligne droite.

Ce nouveau système de piles sans entretoisements et à arêtes courbes fournit pour la première fois la solution complète des piles d'une hauteur quelconque.

§ 5. — Avant-projet de la Tour actuelle.

C'est l'ensemble de ces recherches qui me conduisit de suite à considérer comme réalisable à l'aide d'études approfondies, l'avant-projet que deux de mes plus distingués collaborateurs, MM. Émile Nouguier et Maurice Kœchlin, ingénieurs de ma maison, me présentèrent pour l'édification en vue de l'Exposition de 1889 d'un grand pylône de 300 mètres; cet avant-projet réalisait, d'après des études qui nous étaient communes, le problème de la Tour de 1.000 pieds. Ils s'adjoignirent pour la partie architecturale, M. Sauvestre, architecte.

Je n'hésitai pas à assumer la responsabilité de cette entreprise et à consacrer à sa réalisation des efforts que je ne croyais certes pas, à ce moment, devoir être aussi grands.

Quoique j'aie moi-même dirigé les études définitives et l'exécution de l'œuvre avec l'aide des ingénieurs de ma maison, j'attribue avec d'autant plus de plaisir à MM. Nouguier et Kœchlin, mes collaborateurs habituels, la part qui leur revient, que, soit pour les études définitives, soit pour les travaux de montage, ils n'ont cessé de m'apporter un concours qui m'a été des plus précieux. M. Maurice Kœchlin principalement a suivi toutes les études avec une science et un zèle auxquels je me plais à rendre hommage.

§ 6. — Présentation et approbation des projets.

On me permettra de faire, pour l'historique de cette période, de larges emprunts au magistral *Rapport Général* de M. Alfred Picard, Inspecteur Général des Ponts et Chaussées, Président de section au Conseil d'État, aujourd'hui Commissaire Général de l'Exposition de 1900 (Tome deuxième — Tour Eiffel).

« Ces indications (*sur les hautes piles métalliques*) mettent en lumière et montrent en même temps combien, dans les ouvrages les plus considérables, on était resté loin de la hauteur assignée à la Tour du Champ de Mars. Elles mettent aussi en lumière la part si large prise par M. Eiffel dans l'étude et l'exécution des travaux de ce genre : par sa science, par son expérience, par les progrès considérables qu'il a réalisés dans les procédés de montage, par la puissance de production de ses ateliers, cet éminent constructeur était tout désigné pour entreprendre l'œuvre colossale qui a définitivement consacré sa réputation.

« L'entreprise était bien faite pour tenter un constructeur habile, expérimenté et audacieux, comme M. Eiffel : il n'hésita point à en assumer la charge et à présenter des propositions fermes au Ministre du Commerce et de l'Industrie, en vue de comprendre la Tour dans le cadre de l'Exposition universelle de 1889.

« Dans la pensée de M. Eiffel, cette œuvre colossale devait constituer une éclatante manifestation de la puissance industrielle de notre pays, attester les immenses progrès réalisés dans l'art des constructions métalliques, célébrer l'essor inouï du génie civil au cours de ce siècle, attirer de nombreux visiteurs et contribuer largement au succès des grandes assises pacifiques organisées pour le Centenaire de 1789.

« Les ouvertures de M. Eiffel reçurent un accueil favorable de l'Administration. Lorsque, à la date du 1er mai 1886, M. Lockroy, alors Ministre du Commerce et de l'Industrie, arrêta le programme du concours pour l'Exposition de 1889, il y inséra l'article suivant : « Les concurrents devront étudier la possibilité « d'élever sur le Champ de Mars une tour en fer à base carrée, de 125 mètres de côté à la base et de 300 mètres « de hauteur. Ils feront figurer cette tour sur le plan du Champ de Mars, et, s'ils le jugent convenable, ils « pourront présenter un autre plan sans ladite tour. »

« On peut dire que, dès cette époque, le travail était décidé en principe. »

Peu de jours après, le 12 mai 1886, M. Lockroy instituait une Commission pour l'étude et l'examen du projet d'exécution que j'avais présenté.

Cette Commission était ainsi composée : Le Ministre du Commerce et de l'Industrie, président ; — MM. J. Alphand, Directeur des travaux de la Ville de Paris ; — G. Berger, ancien Commissaire des Expositions internationales ; — E. Brune, architecte, professeur à l'École des Beaux-Arts ; — Ed. Collignon, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées ; — V. Contamin, professeur à l'École Centrale ; — Cuvinot, sénateur ; — Hersent, Président de la Société des ingénieurs civils ; — Hervé-Mangon, Membre de l'Institut ; — Ménard-Dorian, député ; — Molinos, Administrateur des Forges et Aciéries de la Marine ; — Amiral Mouchez, Directeur de l'Observatoire ; — Phillipps, Membre de l'Institut.

« La Commission s'est réunie au Ministère du Commerce et de l'Industrie, le 15 mai 1886. Dans cette première séance, le Ministre a rappelé que l'adoption définitive du projet présenté par M. G. Eiffel restait subordonnée aux décisions ultérieures de la Commission de contrôle et de finances, et que la Commission actuelle était exclusivement chargée d'étudier ce projet au point de vue technique et d'émettre un avis motivé sur les avantages qu'il présente et les modifications qu'il pourrait comporter. La Commission a entendu les explications fournies par M. G. Eiffel et a confié l'étude détaillée des plans et la vérification des calculs à une Sous-Commission composée de MM. Phillipps, Collignon et Contamin.

« Dans sa seconde séance, tenue le 12 juin, la Commission a reçu lecture du rapport présenté, au nom de la Sous-Commission, par M. Collignon, et, par un vote, a adopté à l'unanimité les conclusions de ce rapport. Ensuite, sur l'invitation du Ministre, elle s'est livrée à l'examen des divers autres projets de tour dont le Ministre s'était trouvé saisi dans l'intervalle des deux séances. Après avoir successivement examiné les projets présentés par MM. Boucher, Bourdais, Henry, Marion, Pochet, Robert, Rouyer et Speyser, la Commission a écarté plusieurs d'entre eux comme irréalisables, quelques autres comme insuffisamment étudiés, et finalement, sur la proposition de M. Alphand, elle a déclaré *à l'unanimité*, que la tour à édifier en vue de l'Exposition universelle de 1889 devait offrir nettement un caractère déterminé, qu'elle devait apparaître *comme*

un chef-d'œuvre original d'industrie métallique et *que la tour Eiffel semblait seule répondre pleinement à ce but.* En conséquence, la Commission, dans les limites du mandat purement technique qui lui était confié, a proposé au Ministre l'adoption du projet de tour Eiffel, sous la double réserve que l'ingénieur-constructeur aurait à étudier d'une manière plus précise le mécanisme des ascenseurs, et que trois spécialistes, MM. Mascart, Becquerel et Berger, seraient priés de donner leur avis motivé sur les mesures à prendre au sujet des phénomènes électriques qui pourraient se produire. (*Extrait des procès-verbaux de la Commission.*)

(Nous donnons dans les pièces annexes le Rapport de la Sous-Commission.)

§ 7. — Traité définitif.

« Le 8 janvier 1887 (1), MM. Lockroy, Ministre, Commissaire général de l'Exposition, Poubelle, préfet de la Seine, dûment autorisé par le Conseil municipal, et Eiffel, soumissionnaire, signaient une convention aux termes de laquelle ce dernier s'engageait définitivement à exécuter la Tour de 300 mètres et à la mettre en exploitation à l'ouverture de l'Exposition de 1889.

« M. Eiffel demeurait soumis au contrôle des ingénieurs de l'Exposition et de la Commission spéciale instituée le 12 mai 1886.

« Il recevait :

« 1° Une subvention de 1.500.000 francs, échelonnée en trois termes, dont le dernier échéant à la réception de l'ouvrage;

« 2° L'autorisation d'exploiter la Tour pendant toute la durée de l'Exposition, tant au point de vue de l'ascension du public qu'au point de vue de l'installation de restaurants, cafés ou autres établissements analogues, sous la double condition que le prix de l'ascension serait limité, les jours ordinaires, à 5 francs pour le sommet et à 2 francs pour le premier étage, et les dimanches et jours fériés, à 2 francs pour le sommet et à 1 franc pour le premier étage, et que les concessions de cafés, restaurants, etc., seraient approuvées par le Ministre;

« 3° La continuation de la jouissance pendant vingt ans à compter du 1er janvier 1890.

« A l'expiration de ce dernier délai, la jouissance de la Tour devait faire retour à la Ville de Paris, qui était d'ailleurs substituée à l'État dans la propriété du monument, dès après l'Exposition. »

(Nous donnons dans les pièces annexes le texte intégral de cette convention).

§ 8. — Protestation des Artistes.

« Il avait fallu beaucoup de ténacité à M. Eiffel et quelque courage au Ministre, Commissaire général, pour conclure cette convention.

« Sans parler des sceptiques qui avaient mis en doute la possibilité de mener à bien une œuvre si nouvelle et si gigantesque, on avait assisté à une véritable levée de boucliers de la part des artistes.

« Voici une lettre fort curieuse, au point de vue historique, qui était adressée à M. Alphand, vers le commencement de février 1887, et qui portait la signature des peintres, des sculpteurs, des architectes et des écrivains les plus connus.

Nous venons, écrivains, peintres, sculpteurs, architectes, amateurs passionnés de la beauté jusqu'ici intacte de Paris, protester de toutes nos forces, de toute notre indignation, au nom du goût français méconnu, au nom de l'art et de l'histoire français menacés, contre l'érection, en plein cœur de notre capitale, de l'inutile et monstrueuse tour Eiffel, que la malignité publique, souvent empreinte de bon sens et d'esprit de justice, a déjà baptisée du nom de « Tour de Babel ».

Sans tomber dans l'exaltation du chauvinisme, nous avons le droit de proclamer bien haut que Paris est la ville sans rivale dans le monde. Au-dessus de ses rues, de ses boulevards élargis, le long de ses quais admirables, du milieu de ses magnifiques promenades, surgissent les plus nobles monuments que le génie humain ait enfantés. L'âme de la France, créatrice de chefs-d'œuvre, resplendit parmi cette floraison auguste de pierres. L'Italie, l'Allemagne, les Flandres, si fières à juste titre de leur héritage artistique, ne possèdent rien qui soit comparable au nôtre, et de tous les coins de l'univers Paris attire les curiosités et les admirations. Allons-nous donc laisser profaner tout cela? La ville de Paris va-t-elle donc s'associer plus longtemps aux baroques, aux mercantiles imaginations d'un constructeur de machines, pour s'enlaidir irréparablement et se déshonorer? Car la Tour Eiffel, dont la commerciale Amérique elle-même ne voudrait pas, c'est, n'en doutez pas, le déshonneur de Paris. Chacun le sent, chacun le dit, chacun s'en afflige profondément, et nous ne sommes qu'un faible écho de l'opinion universelle, si légitimement alarmée. Enfin,

(1) *Rapport Général* de M. Alfred Picard.

lorsque les étrangers viendront visiter notre Exposition, ils s'écrieront, étonnés : « Quoi ? C'est cette horreur que les Français ont trouvée pour nous donner une idée de leur goût si fort vanté ? » Ils auront raison de se moquer de nous, parce que le Paris des gothiques sublimes, le Paris de Jean Goujon, de Germain Pilon, de Puget, de Rude, de Barye, etc..., sera devenu le Paris de M. Eiffel.

Il suffit d'ailleurs, pour se rendre compte de ce que nous avançons, de se figurer un instant une tour vertigineusement ridicule, dominant Paris, ainsi qu'une noire et gigantesque cheminée d'usine, écrasant de sa masse barbare Notre-Dame, la Sainte-Chapelle, la tour Saint-Jacques, le Louvre, le dôme des Invalides, l'Arc de Triomphe, tous nos monuments humiliés, toutes nos architectures rapetissées, qui disparaîtront dans ce rêve stupéfiant. Et pendant vingt ans, nous verrons s'allonger sur la ville entière, frémissante encore du génie de tant de siècles, nous verrons s'allonger comme une tache d'encre l'ombre odieuse de l'odieuse colonne de tôle boulonnée.

C'est à vous qui aimez tant Paris, qui l'avez tant embelli, qui l'avez tant de fois protégé contre les dévastations administratives et le vandalisme des entreprises industrielles, qu'appartient l'honneur de le défendre une fois de plus. Nous nous en remettons à vous du soin de plaider la cause de Paris, sachant que vous y dépenserez toute l'énergie, toute l'éloquence, que doit inspirer à un artiste tel que vous l'amour de ce qui est beau, de ce qui est grand, de ce qui est juste. Et si notre cri d'alarme n'est pas entendu, si nos raisons ne sont pas écoutées, si Paris s'obstine dans l'idée de déshonorer Paris, nous aurons du moins, vous et nous, fait entendre une protestation qui honore.

« De la forme de cette philippique, je ne dirai rien : les grands écrivains qui l'ont revêtue de leur signature avaient cependant donné jusqu'alors à leurs lecteurs une idée différente de la langue française.

« Dans le fond, l'attaque était tout à fait excessive, quelles que fussent les vues des protestataires sur la valeur esthétique de l'œuvre. Le crime qu'allaient commettre les organisateurs de l'Exposition, de complicité avec M. Eiffel, n'était point si noir que Paris dût en être à jamais déshonoré. De pareilles exagérations peuvent s'excuser de la part des artistes, peintres, sculpteurs et même compositeurs de musique : tout leur est permis; ils possèdent le monopole du goût; eux seuls ont le sentiment du beau; leur sacerdoce est infaillible; leurs oracles sont indiscutables. Peut-être les auteurs dramatiques, les poètes, les romanciers et autres signataires de la lettre méritaient-ils moins d'indulgence.

« M. Lockroy, qui, pour être ministre, n'avait rien perdu de son esprit si fin ni de sa verve si mordante, remit à M. Alphand une réponse que j'ai plaisir à reproduire, en me bornant à en retrancher un passage pour ne point citer de nom propre :

Les journaux publient une soi-disant protestation à vous adressée par les artistes et les littérateurs français. Il s'agit de la Tour Eiffel, que vous avez contribué à placer dans l'enceinte de l'Exposition Universelle. A l'ampleur des périodes, à la beauté des métaphores, à l'atticisme d'un style délicat et précis, on devine, sans même regarder les signatures, que la protestation est due à la collaboration des écrivains et des poètes les plus célèbres de notre temps.

Cette protestation est bien dure pour vous, Monsieur le Directeur des travaux. Elle ne l'est pas moins pour moi. Paris « frémissant encore du génie de tant de siècles », dit-elle, et qui « est une floraison auguste de pierres parmi lesquelles resplendit l'âme de la France », serait déshonoré si on élevait une tour dont « la commerciale Amérique ne voudrait pas ». « Cette main barbare », ajoute-t-elle dans le langage vivant et coloré qu'elle emploie, gâtera le « Paris des gothiques sublimes », le Paris des Goujon, des Pilon, des Barye, et des Rude.

Ce dernier passage vous frappera sans doute autant qu'il m'a frappé, « car l'art et l'histoire français », comme dit la protestation, ne m'avaient point appris encore que les Pilon, les Barye, ou même les Rude, fussent des gothiques sublimes. Mais quand des artistes compétents affirment un fait de cette nature, nous n'avons qu'à nous incliner....

Ne vous laissez donc pas impressionner par la forme qui est belle, et voyez les faits. La protestation manque d'à-propos. Vous ferez remarquer aux signataires qui vous l'apporteront que la construction de la Tour Eiffel est décidée depuis un an et que le chantier est ouvert depuis un mois. On pouvait protester en temps utile : on ne l'a pas fait, et « l'indignation qui honore » a le tort d'éclater juste trop tard.

J'en suis profondément peiné. Ce n'est pas que je craigne pour Paris. Notre-Dame restera Notre-Dame et l'Arc de Triomphe restera l'Arc de Triomphe. Mais j'aurais pu sauver la seule partie de la grande ville qui fût sérieusement menacée : cet incomparable carré de sable qu'on appelle le Champ de Mars, si digne d'inspirer les poètes et de séduire les paysagistes.

Vous pouvez exprimer ce regret à ces Messieurs. Ne leur dites pas qu'il est pénible de ne voir attaquer l'Exposition que par ceux qui devraient la défendre ; qu'une protestation signée de noms si illustres aura du retentissement dans toute l'Europe et risquera de fournir un prétexte à certains étrangers pour ne point participer à nos fêtes ; qu'il est mauvais de chercher à ridiculiser une œuvre pacifique à laquelle la France s'attache avec d'autant plus d'ardeur, à l'heure présente, qu'elle se voit plus injustement suspectée au dehors. De si mesquines considérations touchent un ministre : elles n'auraient point de valeur pour des esprits élevés que préoccupent avant tout les intérêts de l'art et l'amour du beau.

Ce que je vous prie de faire, c'est de recevoir la protestation et de la garder. Elle devra figurer dans les vitrines de l'Exposition. Une si belle et si noble prose signée de noms connus dans le monde entier ne pourra manquer d'attirer la foule et, peut-être, de l'étonner.

« Cette page bien française a dû étonner quelque peu les expéditionnaires du Ministère ; la correspondance administrative n'est malheureusement d'ordinaire ni si vive, ni si gaie, ni si spirituelle; sa sévérité

s'accommode mal à nos vieilles traditions gauloises. Si M. Lockroy pouvait faire école, l'exercice des fonctions publiques serait moins monotone et certainement mieux apprécié. Le Ministre avait su mettre les rieurs de son côté. Son procès était gagné. »

Je dois ajouter, pour être juste, que les plus célèbres parmi les signataires de la protestation lue plus haut, s'empressèrent, une fois l'œuvre achevée et consacrée par le succès, de me témoigner leur regret d'avoir cédé aux importunités de ceux qui colportaient ce ridicule factum et d'y avoir donné leur signature. Mais il n'en est pas moins vrai que s'il s'était produit avant qu'il ne fût beaucoup trop tard pour être d'un effet quelconque, il aurait rendu plus difficile encore l'appui que le Ministre, M. Lockroy, accorda au projet, et il en aurait peut-être empêché la réalisation, et ce au grand préjudice de l'Exposition de 1889, dont la Tour a été sans conteste un des grands éléments de succès.

On me permettra de rappeler ce que je disais moi-même dans un entretien que j'eus à ce sujet avec M. Paul Bourde et qui fut reproduit dans le journal *le Temps* :

« Quels sont les motifs que donnent les artistes pour protester contre l'érection de la Tour? Qu'elle est inutile et monstrueuse! Nous parlerons de l'utilité tout à l'heure. Ne nous occupons pour le moment que du mérite esthétique sur lequel les artistes sont plus particulièrement compétents.

« Je voudrais bien savoir sur quoi ils fondent leur jugement. Car, remarquez-le, Monsieur, cette Tour, personne ne l'a vue et personne, avant qu'elle ne soit construite, ne pourrait dire ce qu'elle sera. On ne la connaît jusqu'à présent que par un simple dessin géométral; mais, quoiqu'il ait été tiré à des centaines de mille exemplaires, est-il permis d'apprécier avec compétence l'effet général artistique d'un monument d'après un simple dessin, quand ce monument sort tellement des dimensions déjà pratiquées et des formes déjà connues?

« Et, si la Tour, quand elle sera construite, était regardée comme une chose belle et intéressante, les artistes ne regretteraient-ils pas d'être partis si vite et si légèrement en campagne ? Qu'ils attendent donc de l'avoir vue pour s'en faire une juste idée et pouvoir la juger.

« Je vous dirai toute ma pensée et toutes mes espérances. Je crois, pour ma part, que la Tour aura sa beauté propre. Parce que nous sommes des ingénieurs, croit-on donc que la beauté ne nous préoccupe pas dans nos constructions et qu'en même temps que nous faisons solide et durable, nous ne nous efforçons pas de faire élégant? Est-ce que les véritables conditions de la force ne sont pas toujours conformes aux conditions secrètes de l'harmonie? Le premier principe de l'esthétique architecturale est que les lignes essentielles d'un monument soient déterminées par la parfaite appropriation à sa destination. Or, de quelle condition ai-je eu, avant tout, à tenir compte dans la Tour? De la résistance au vent. Eh bien! je prétends que les courbes des quatre arêtes du monument telles que le calcul les a fournies, qui, partant d'un énorme et inusité empatement à la base, vont en s'effilant jusqu'au sommet, donneront une grande impression de force et de beauté; car elles traduiront aux yeux la hardiesse de la conception dans son ensemble, de même que les nombreux vides ménagés dans les éléments mêmes de la construction accuseront fortement le constant souci de ne pas livrer inutilement aux violences des ouragans, des surfaces dangereuses pour la stabilité de l'édifice.

« Il y a, du reste, dans le colossal une attraction, un charme propre, auxquels les théories d'art ordinaires ne sont guère applicables. Soutiendra-t-on que c'est par leur valeur artistique que les Pyramides ont si fortement frappé l'imagination des hommes? Qu'est-ce autre chose, après tout, que des monticules artificiels? Et pourtant, quel est le visiteur qui reste froid en leur présence? Qui n'en est pas revenu rempli d'une irrésistible admiration? Et quelle est la source de cette admiration, sinon l'immensité de l'effort et la grandeur du résultat?

« La Tour sera le plus haut édifice qu'aient jamais élevé les hommes. — Ne sera-t-elle donc pas grandiose aussi à sa façon? Et pourquoi ce qui est admirable en Égypte deviendrait-il hideux et ridicule à Paris? Je cherche et j'avoue que je ne trouve pas.

« La protestation dit que la Tour va écraser de sa grosse masse barbare Notre-Dame, la Sainte-Chapelle, la tour Saint-Jacques, le Louvre, le dôme des Invalides, l'Arc de Triomphe, tous nos monuments. Que de choses à la fois! Cela fait sourire, vraiment. Quand on veut admirer Notre-Dame, on va la voir du parvis. En quoi du Champ de Mars la Tour gênera-t-elle le curieux placé sur le parvis Notre-Dame, qui ne la verra pas? C'est d'ailleurs une des idées les plus fausses, quoique des plus répandues, même parmi les artistes,

que celle qui consiste à croire qu'un édifice élevé écrase les constructions environnantes. Regardez si l'Opéra ne paraît pas plus écrasé par les maisons du voisinage, qu'il ne les écrase lui-même. Allez au rond-point de l'Étoile, et parce que l'Arc de Triomphe est grand, les maisons de la place ne vous en paraîtront pas plus petites. Au contraire, les maisons ont bien l'air d'avoir la hauteur qu'elles ont réellement, c'est-à-dire à peu près quinze mètres, et il faut un effort de l'esprit pour se persuader que l'Arc de Triomphe en mesure quarante-cinq, c'est-à-dire trois fois plus.

« Donc, pour ce qui est de l'effet artistique de la Tour, personne n'en peut juger à l'avance; la grandeur de la base m'étonne moi-même, aujourd'hui que les fondations commencent à sortir de terre. Quant au préjudice qu'elle portera aux autres monuments de Paris, ce sont là des mots.

« Reste la question d'utilité. Ici, puisque nous quittons le domaine artistique, il me sera bien permis d'opposer à l'opinion des artistes, celle du public.

« Je ne crois point faire preuve de vanité en disant que jamais projet n'a été plus populaire; j'ai tous les jours la preuve qu'il n'y a pas dans Paris de gens, si humbles qu'ils soient, qui ne le connaissent et ne s'y intéressent. A l'étranger même, quand il m'arrive de voyager, je suis étonné du retentissement qu'il a eu.

« Quant aux savants, les vrais juges de la question d'utilité, je puis dire qu'ils sont unanimes.

« Non seulement la Tour promet d'intéressantes observations pour l'astronomie, la météorologie et la physique, non seulement elle permettra en temps de guerre de tenir Paris constamment relié au reste de la France, mais elle sera en même temps la preuve éclatante des progrès réalisés en ce siècle par l'art des ingénieurs.

« C'est seulement à notre époque, en ces dernières années, que l'on pouvait dresser des calculs assez sûrs et travailler le fer avec assez de précision pour songer à une aussi gigantesque entreprise.

« N'est-ce rien pour la gloire de Paris que ce résumé de la science contemporaine soit érigé dans ses murs?

« La protestation gratifie la Tour d' « odieuse colonne de tôle boulonnée ». Je n'ai point vu ce ton de dédain sans une certaine impression irritante. Il y a parmi les signataires des hommes qui ont toute mon admiration; mais il y en a beaucoup d'autres qui ne sont connus que par des productions de l'art le plus inférieur ou par celles d'une littérature qui ne profite pas beaucoup au bon renom de notre pays.

« M. de Vogüé, dans un récent article de la *Revue des Deux Mondes*, après avoir constaté que dans n'importe quelle ville d'Europe où il passait, il entendait répéter les plus ineptes chansons alors à la mode dans nos cafés-concerts, se demandait si nous étions en train de devenir les *Græculi* du monde contemporain. Il me semble que n'eût-elle pas d'autre raison d'être que de montrer que nous ne sommes pas simplement le pays des amuseurs, mais aussi celui des ingénieurs et des constructeurs qu'on appelle de toutes les régions du monde pour édifier les ponts, les viaducs, les gares et les grands monuments de l'industrie moderne, la Tour Eiffel mériterait d'être traitée avec considération. »

J'ai tenu à reproduire cette réplique, malgré la vivacité de sa forme, parce qu'elle rappelle l'ardeur des polémiques qui avaient été engagées au moment de la construction et les difficultés sans cesse renaissantes contre lesquelles pendant deux années j'ai eu jusqu'au bout à lutter. Mais, mon projet avait deux puissants auxiliaires qui lui sont encore fidèles : le patronage des hommes connus par leur haute science et la force irrésistible de l'opinion du grand public.

§ 9. — Autres objections contre la Tour et son utilité.

Les objections les plus fréquemment mises en avant étaient que la construction elle-même était impossible, que jamais on ne pourrait lui donner une résistance capable de s'opposer à la violence du vent; que même y arrivât-on *sur le papier*, on ne trouverait pas d'ouvriers capables de travailler à cette hauteur, les difficultés devant être encore aggravées par les énormes oscillations que prendrait cette colossale tige de fer sous l'effet des vents.

Ces objections, qui semblent actuellement bien puériles, ne me touchaient guère. Je savais, par mes travaux antérieurs, que quand il s'agit de constructions métalliques, la science de la Résistance des matériaux est parvenue, de notre temps, à un degré de certitude qui permet d'être assuré par le calcul, de la déter-

mination des efforts en chaque point de la construction et des résistances qu'on peut leur appliquer. Je savais aussi par l'expérience acquise aux grands viaducs de Garabit, de la Tarde, etc., que je n'avais eu aucune difficulté à recruter des hommes travaillant à l'aise au-dessus de vides atteignant 125 mètres, et pour lesquels l'effet de la hauteur était sans conséquence appréciable. Quant aux oscillations, le calcul les montrait si faibles et si lentes que les ouvriers portés par la construction n'en devaient ressentir aucun effet gênant et à peine s'en apercevoir.

J'eus bien davantage à lutter contre cette objection sans cesse renaissante de l'*inutilité* de la Tour qui était la *tarte à la crème* courante. Voici ce que je ne cessais de répéter :

Connue du monde entier, la Tour a frappé l'imagination de tous en leur inspirant le désir de visiter les merveilles de l'Exposition, et il est indiscutable qu'elle a excité un intérêt et une curiosité universels.

Étant la plus saisissante manifestation de l'art des constructions métalliques par lesquelles nos ingénieurs se sont illustrés en Europe, elle est une des formes les plus frappantes de notre génie national moderne.

En dehors de ces premiers résultats, dont l'importance matérielle et morale est capitale dans la circonstance, il n'est pas douteux que les visiteurs qui seront transportés au sommet de la Tour auront un vif plaisir à contempler sans danger et d'une plate-forme solide, le magnifique panorama qui les entourera. A leurs pieds, ils verront la grande ville avec ses innombrables monuments, ses avenues, ses clochers et ses dômes, la Seine qui l'entoure comme un long ruban d'argent; plus loin, les collines qui lui forment une ceinture verdoyante, et par-dessus ces collines, un immense horizon d'une étendue de 180 kilomètres. On aura autour de soi un site d'une beauté incomparable et nouvelle, devant lequel chacun sera vivement impressionné par le sentiment des grandeurs et des beautés de la nature, en même temps que par la puissance de l'effort humain. Ces spectacles ne sont-ils pas de ceux qui élevent l'âme?

La Tour aura en outre des applications très variées, soit au point de vue de notre défense nationale, soit dans le domaine de la science.

« En cas de guerre ou de siège, on pourrait, du haut de la Tour, observer les mouvements de l'ennemi dans un rayon de plus de 70 kilomètres, et cela par-dessus les hauteurs qui entourent Paris, et sur lesquelles sont construits nos nouveaux forts de défense. Si l'on eût possédé la Tour pendant le siège de Paris en 1870, avec les foyers électriques intenses dont elle sera munie, qui sait si les chances de la lutte n'eussent pas été profondément modifiées? La Tour serait la communication constante et facile entre Paris et la province à l'aide de la télégraphie optique, dont les procédés ont atteint une si remarquable perfection. » (Max de Nansouty. — *La Tour Eiffel.*)

Elle est elle-même à une distance telle des forts de défense qu'elle est absolument hors de portée des batteries de l'ennemi.

Elle sera, enfin, un observatoire météorologique merveilleux, dans lequel on pourra étudier utilement, au point de vue de l'hygiène et de la science, la direction et la violence des courants atmosphériques, l'état et la composition chimique de l'atmosphère, son électrisation, son hygrométrie, la variation de température à diverses hauteurs, etc.

Comme observations astronomiques, la pureté de l'air à cette grande hauteur et l'absence des brumes basses qui recouvrent le plus souvent l'horizon de Paris, permettront de faire un grand nombre d'observations d'astronomie physique, souvent impossibles dans notre région.

Il faut encore y ajouter l'étude de la chute des corps dans l'air, la résistance de l'air sous différentes vitesses, l'étude de la compression des gaz ou des vapeurs sous la pression d'un immense manomètre à mercure de 400 atmosphères, et toute une série d'expériences physiologiques du plus haut intérêt.

Ce sera donc pour tous un observatoire et un laboratoire tels qu'il n'en aura jamais été mis d'analogue à la disposition de la science. C'est la raison pour laquelle, dès le premier jour, tous nos savants m'ont encouragé par leurs plus hautes sympathies. Parmi ceux-ci, je dois citer tout d'abord M. Hervé Mangon, membre de l'Institut, qui, dès le 3 mars 1885, dans une communication à la Société Météorologique de France, détaillait avec une grande science les services que devait rendre la Tour « dont, disait-il le premier, l'utilité comme instrument de recherches scientifiques ne saurait être mise en doute ».

A ce nom je dois ajouter celui de l'amiral Mouchez, directeur de l'Observatoire, du colonel Perrier, connu par ses grands travaux géodésiques, de M. Janssen, directeur de l'Observatoire de Meudon, etc.

Je puis maintenant ajouter que l'expérience a réalisé leurs prévisions et, dans cet ouvrage, j'aurai à consacrer tout un chapitre spécial aux applications scientifiques et militaires de la Tour et aux recherches que je viens d'énumérer.

Sans m'attarder à rappeler toutes les difficultés que rencontrent, semées complaisamment sous leurs pas, tous ceux qui veulent entreprendre une œuvre nouvelle, je dirai seulement que, grâce aux bonnes raisons que je viens d'exposer rapidement et à la persévérance que je mis à leur service, la cause fut enfin gagnée : il n'y eut plus qu'à déterminer l'emplacement définitif sur lequel la Tour devait s'élever (1).

§ 10. — Choix de l'emplacement définitif de la Tour.

Voici sur ce sujet comment s'exprime M. Alfred Picard dans son *Rapport Général.*

« La première question à résoudre était celle de l'emplacement définitif de la Tour.

« De graves objections étaient faites au choix du Champ de Mars.

« Était-il rationnel de construire la Tour dans le fond de la vallée de la Seine? Ne valait-il pas mieux la placer sur un point élevé, sur une éminence, qui lui servirait en quelque sorte de piédestal et en augmenterait le relief?

« Ce gigantesque pylône n'allait-il pas écraser les palais du Champ de Mars ?

« Convenait-il d'édifier un monument définitif dans l'emplacement où seraient sans aucun doute organisées les expositions futures, de s'astreindre ainsi à le faire nécessairement entrer dans le cadre de ces expositions, alors que la nouveauté des installations est l'un des éléments essentiels, sinon l'élément primordial du succès?

« Certes les critiques étaient graves. Mais, en éloignant la Tour, on eût tout à la fois compromis le succès financier de l'entreprise et perdu une forte part du bénéfice qu'elle devait apporter à l'Exposition de 1889. Il ne restait donc à choisir qu'entre le Champ de Mars et la place du Trocadéro.

« L'adoption de ce dernier emplacement n'eût fait gagner qu'une hauteur de 25 mètres environ, chiffre bien minime relativement aux 300 mètres de la Tour; elle aurait donné lieu aux plus sérieuses difficultés pour l'assiette des fondations sur un sol profondément excavé par les anciennes carrières de Paris; enfin le contact immédiat du monument avec le palais du Trocadéro eût certainement produit un effet désastreux.

« Il fallut accepter le Champ de Mars. Du reste, à côté de ses inconvénients, cette solution avait de réels avantages; elle permettait notamment d'utiliser la Tour comme entrée monumentale de l'Exposition, en face du pont d'Iéna, d'éviter par suite la construction d'une entrée spéciale et de réaliser de ce chef une grosse économie, tout en dotant le concessionnaire d'une subvention de 1.500.000 francs.

« Cette dernière considération, qui avait si justement frappé M. Lockroy, n'a peut-être pas toujours été suffisamment appréciée. »

En d'autres termes, la Tour est née de l'Exposition; sans celle-ci, il est probable qu'elle n'eût pas été édifiée; elle devait donc contribuer à son embellissement et à son attraction, en même temps qu'elle en bénéficierait elle-même. Son emplacement ne pouvait donc être que dans l'enceinte même de l'exposition. Si celle-ci avait été à Courbevoie, la Tour l'y aurait certainement suivie; mais l'Exposition étant au Champ de Mars, il est peu sérieux de regretter que la Tour n'ait pas été édifiée sur le mont Valérien.

L'expérience a montré d'ailleurs que l'on ne pouvait faire un meilleur choix comme emplacement. La Tour formait en effet, dans celui qui a été adopté, une entrée triomphale à l'Exposition, et, sous ses grands arceaux, on voyait du pont d'Iéna se découper le Dôme central qui conduisait à la galerie des Machines et, de chaque côté, les dômes des galeries des Beaux-Arts et des Arts libéraux, où ils s'encadraient merveilleusement.

De l'intérieur même des jardins de l'Exposition, apparaissait le Trocadéro qui formait le fond d'un admirable décor. En un mot, au grand étonnement de beaucoup de personnes des plus compétentes, mais non au mien, elle encadrait tout et n'écrasait rien, pas même les intéressants édicules de l'habitation humaine construits à ses pieds.

(1) Au dernier moment même et les travaux étant sur le point de commencer, je dus les suspendre et tout parut un instant compromis. L'un des riverains du Champ de Mars, en prévision du danger que lui faisait courir la chute de la Tour sur son habitation, intenta contre l'État et la Ville de Paris, une action judiciaire dont le résultat pouvait se faire longtemps attendre et arrêtait l'exécution des travaux. Je ne pus être autorisé à les entreprendre qu'à mes risques et périls *en me portant fort* pour les deux parties appelées en cause et en acceptant la pleine et entière responsabilité des condamnations qu'elles pouvaient encourir, fût-ce même la démolition de l'ouvrage. Le procès perdu en première instance par le riverain ne fut pas suivi en appel.

A mon avis donc et à tous ces points de vue, les uns de nécessité pratique, les autres de groupement architectural, la solution adoptée semble être celle qui était préférable.

§ 11. — Esquisse générale de la Tour.

La Tour (voir Pl. I, fig. 1 et 2) a la forme d'une pyramide quadrangulaire à faces courbes, dont la hauteur est partagée en trois étages : le premier situé à 57,63 *m.* au-dessus du sol (+ 33,50), le deuxième à 115,73 *m.*, et le troisième à 276,13 *m.* C'est ce dernier plancher qui porte le campanile formant le couronnement de la Tour et la lanterne du phare dont la plate-forme supérieure est à la hauteur de 300,51 *m.* au-dessus du sol.

Les arêtes de la pyramide sont constituées jusqu'à la hauteur du deuxième étage par quatre montants ou piliers distincts ayant la forme de caissons carrés. A la naissance de l'ossature métallique, c'est-à-dire dans le plan horizontal passant par les points où elle s'appuie sur les soubassements en maçonnerie, ces quatre montants ont leurs centres situés suivant les sommets d'un carré de 101,40 *m.* de côté (voir Pl. III, fig. 2). Depuis le sol jusqu'au niveau inférieur des grandes poutres en treillis qui supportent le premier étage et entretoisent les montants en formant une première ceinture horizontale, ces montants ont une inclinaison constante et leurs faces une largeur également constante de 15 mètres. Cette inclinaison est de 65°,48'49 dans le plan des faces et de 54°,35'26" dans le plan diagonal qui contient la projection de l'axe du montant.

Au delà du premier étage, leur inclinaison devient variable ainsi que leur largeur, qui va en décroissant progressivement jusqu'au deuxième étage, où elle n'est plus que de 10,41 *m.*

A ce deuxième étage, de nouvelles poutres horizontales entretoisent les quatre montants; mais, au delà, le mode de construction change : les faces extérieures des montants se réunissent deux à deux, leurs faces intérieures disparaissent et l'on n'a plus dans cette partie supérieure de la Tour, qu'un grand caisson unique en forme de tronc de pyramide quadrangulaire dont la base, à la hauteur de 115,73 *m.*, a 31,70 *m.* de côté et dont celle au niveau du troisième étage, c'est-à-dire à la hauteur de 276,13 *m.*, a seulement 10,00 *m.*

Des arcs de 74 mètres de diamètre se développent entre les montants à l'étage inférieur; mais leur rôle est purement décoratif.

Au premier étage sont installés, dans les espaces compris entre les montants d'une même face, quatre restaurants; de plus une galerie couverte extérieure, portée par des consoles et ayant 270 mètres de développement, fait le tour de la construction.

Tout l'espace compris entre les montants et dans l'intérieur de ceux-ci, porte un plancher laissant un grand vide central entouré d'un garde-corps.

La surface totale des planchers de cet étage, déduction faite des vides pour le passage des ascenseurs, mais en y comprenant la galerie, est de 4.010 mètres carrés. La surface couverte par les galeries et les restaurants est de 2.760 mètres carrés.

Le deuxième étage a aussi une galerie extérieure établie de la même manière que celle du premier étage, mais d'un développement moindre (136 mètres). Le plancher s'étend à cet étage sur toute la section de la Tour, sans vide central, et donne une surface de 1.300 mètres carrés. Sur ce plancher étaient établis une boulangerie, une imprimerie du *Figaro*, des abris fermés et des kiosques divers.

Le troisième étage est complètement couvert et donne avec les consoles extérieures une surface de 270 mètres carrés. Il forme une sorte de cage vitrée par des glaces mobiles, d'où les visiteurs peuvent, à l'abri du vent qui règne fréquemment à ces hauteurs, observer le panorama qui les entoure.

Immédiatement au-dessus de cette partie couverte, se trouve une terrasse que j'avais tenu à me réserver; le centre en est occupé par des laboratoires scientifiques et par une petite pièce servant aux réceptions.

Au-dessus de ce bâtiment central, sont disposées les poutres en croix supportant les poulies de transmission de l'ascenseur Edoux. Elles sont surmontées des quatre grands arceaux à jour supportant le phare du sommet. C'est sur la coupole supérieure de ce phare que s'appuie la petite plate-forme de 1,70 *m.* de diamètre, qui est exactement à la hauteur de 300 mètres au-dessus du sol.

On peut y accéder facilement par des échelles intérieures, et l'on n'a plus au-dessus de soi que le paratonnerre.

Le premier étage est desservi par deux escaliers droits de 1,00 *m.* de largeur et quatre ascenseurs inclinés; deux de ces ascenseurs se prolongent jusqu'au deuxième étage. Entre le premier et le deuxième étage existent quatre escaliers en hélice, ayant seulement 0,60 *m.* de largeur. Enfin, la circulation entre le deuxième et le troisième étage se fait au moyen d'un seul ascenseur vertical avec changement de cabine au milieu du trajet. Un escalier unique, interdit au public, relie aussi les deux étages supérieurs.

Toutes les machines servant, soit au fonctionnement des ascenseurs, soit à la production de l'électricité, sont placées dans les soubassements des piles et principalement dans la pile du côté Grenelle-École Militaire (laquelle, ainsi qu'il sera indiqué plus loin, porte la désignation n° 3 ou Sud); elles se composent essentiellement de générateurs et de pompes qui refoulent l'eau dans des réservoirs situés aux différents étages; des tuyaux partant de ces réservoirs amènent l'eau sous les pistons qui font manœuvrer les ascenseurs.

L'axe du Champ de Mars étant très sensiblement incliné à 45° sur le méridien, la Tour se trouve orientée de telle façon que ses pieds sont situés aux quatre points cardinaux.

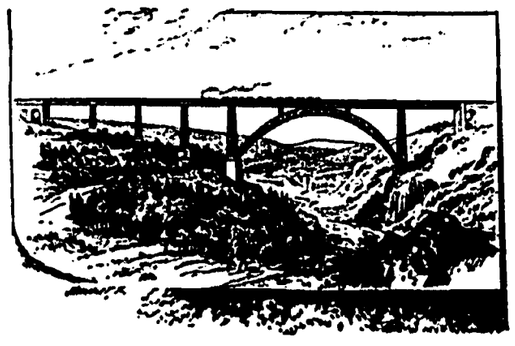
Les piliers ont été numérotés en prenant pour origine celui qui est placé près de la Seine du côté du centre de Paris. Ce pilier qui porte le numéro 1 est le pilier Nord. L'ordre des numéros ayant été établi suivant le sens des aiguilles d'une montre, les autres piliers portent les désignations : 2 ou Ouest, 3 ou Sud, 4 ou Est.

Comme principes de construction, nous avons admis au point de vue de la matière, l'emploi à peu près exclusif du fer de préférence à l'acier, qui a une rigidité moindre; au point de vue de la forme des éléments, nous avons adopté celle que j'ai toujours préconisée dans nos constructions et notamment dans nos piles; c'est-à-dire celle en *caissons* qui, avec le minimum de section, donne le maximum de résistance longitudinale et transversale, et permet aux pièces ainsi constituées de travailler aussi bien à la compression qu'à l'extension.

L'emploi de cette forme en caissons, avec parois pleines pour les pièces d'exceptionnelle résistance, et avec parois évidées en treillis pour toutes les autres beaucoup plus nombreuses, est une des caractéristiques du système de construction de la Tour.

Cet emploi presque général des caissons en treillis s'impose d'autant plus ici qu'il permet pour une résistance déterminée de n'opposer au vent que le minimum de surface.

Avant d'aller plus loin et d'entrer dans la période de l'exécution, il convient d'abord de donner les calculs résultant de l'étude définitive du projet.



DEUXIÈME PARTIE

CALCULS & DESCRIPTION
DE L'OSSATURE

CHAPITRE I
COMPOSITION DES ÉLÉMENTS DE LA TOUR

§ 1. — Division en panneaux et sections.

Les deux efforts auxquels la Tour doit résister, en dehors des effets de la température, sont ceux dus aux charges verticales et ceux dus au vent. Ces derniers sont d'une majeure importance : dans les parties hautes de la Tour, en effet, le coefficient de travail dû au vent est presque le triple de celui dû aux charges. Dans les parties basses, il reste encore égal à la moitié environ de celui-ci.

Quant au mode de calcul, il diffère suivant que l'on considère la partie supérieure de la Tour, dans laquelle tous les arbalétriers sont réunis solidairement par un treillis, ou la partie inférieure formée par quatre montants isolés, dont chacun est constitué par quatre arbalétriers réunis par des treillis.

La première partie s'étend depuis le campanile jusqu'au niveau de la deuxième plate-forme; la seconde va de ce niveau à celui des appuis.

La charpente métallique est divisée en panneaux formés par les trapèzes indéformables déterminés par les entretoises horizontales, les portions d'arbalétriers inclinés et par les barres de treillis formant diagonales.

Ces panneaux sont numérotés de 1 à 29, en commençant par le bas (Pl. XXXI).

Pour les calculs des efforts dans les arbalétriers et pour éviter toute confusion, nous numéroterons les sections différemment, en les désignant par des chiffres romains et en allant de haut en bas. La section I est celle qui se trouve à la partie inférieure du panneau 28, la section II à la partie inférieure du panneau 27, etc... La section XVII est située à la partie inférieure du panneau 11, au niveau de la deuxième plate-forme et sépare la partie supérieure de la Tour de la partie inférieure. La dernière section porte le n° XXVIII et se trouve à la partie basse du dernier panneau, au niveau de l'entretoise qui réunit les appuis.

§ 2. — Sections des arbalétriers et des treillis.

Ces sections sont dessinées et calculées dans la planche XXXI, ce qui nous dispense d'en donner une description détaillée.

Arbalétriers. — Partie supérieure. — Les diagrammes figures 1 et 2 indiquent la disposition des arbalétriers, lesquels comprennent, au niveau de la 2e plate-forme, quatre arbalétriers d'angle *c*, et deux arbalétriers intermédiaires *b* et *d* sur chacune des faces. A partir de la section XI, les arbalétriers intermédiaires se réunissent en un seul *bd*.

Nous désignerons par ω la surface de tous les arbalétriers d'une face et par Ω la surface de tous les arbalétriers des quatre faces.

Tableau des surfaces des sections des arbalétriers dans la partie supérieure, en millimètres carrés.

NUMÉROS DES SECTIONS.	ARBALÉTRIER D'ANGLE c	ARBALÉTRIER INTERMÉDIAIRE bd	ARBALÉTRIERS D'UNE FACE ω	ENSEMBLE DES ARBALÉTRIERS Ω
I	31.768	20.400	83.936	208 672
II	38.768	20.400	97.936	236.672
III	38.768	20.400	97 936	236.672
IV	38.768	20.400	97.936	236.672
V	38.768	20.400	97 936	236.672
VI	38.768	20.400	97.936	236.672
VII	38.768	20.400	97.936	236.672
VIII	54.768	20.400	129.936	300.672
IX	54.768	20.400	129.936	300.672
X	57.768	20.400	135.936	312.672
XI	67.307	33.536	168.150	403.372

NUMÉROS DES SECTIONS.	ARBALÉTRIER D'ANGLE c	ARBALÉTRIERS INTERMÉDIAIRES b ou d	ARBALÉTRIERS D'UNE FACE ω	ENSEMBLE DES ARBALÉTRIERS Ω
XII	65.307	20.307	183.228	471.684
XIII	65.307	20.307	183.228	471.684
XIV	65.307	30.307	203.228	531.684
XV	65.307	41.307	213.228	591.684
XVI	65.307	41.307	213.228	591.684
XVII	65.307	41.307	213.228	591.684

Arbalétriers. — Partie inférieure. — Les quatre montants qui composent l'ossature de la Tour au-dessous de la seconde plate-forme sont semblables. Ils se composent chacun de 4 arbalétriers d'angle a, b, c, d, dont la composition est donnée dans la planche XXXI.

Dans le tableau suivant nous résumons les surfaces des sections de chaque arbalétrier ainsi que leur surface de section totale Ω.

Tableau des surfaces des sections des arbalétriers dans la partie inférieure, en millimètres carrés.

NUMÉROS DES SECTIONS.	ARBALÉTRIERS a	ARBALÉTRIERS b ou d	ARBALÉTRIERS c	ENSEMBLE DES ARBALÉTRIERS a, b, c et d Ω
XVIII	43.136	55.664	56.308	210.772
XIX	51.664	55.664	63.832	226.824
XX	51.664	55.622	59.616	222.524
XXI	51.584	59.736	59.424	230.480
XXII	51.424	67.908	67.544	254.784
XXIII	51.024	67.376	66.928	252.704

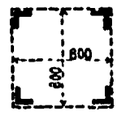
NUMÉROS DES SECTIONS.	ARBALÉTRIERS a	ARBALÉTRIERS b ou d	ARBALÉTRIERS c	ENSEMBLE DES ARBALÉTRIERS a, b, c et d Ω
XXIV	82.824	77.892	77.892	316.500
XXV	79.992	84.792	84.792	334.368
XXVI	84.792	87.992	87.992	348.768
XXVII	87.992	91.192	87.992	358.368
XXVIII	95.992	91.192	87.992	366.368

Treillis. — Les barres de treillis sont toutes en forme de caisson et sont composées de 4 cornières d'angle réunies par un petit treillis.

Nous donnons ci-dessous les dimensions de ces cornières, ainsi que la surface des sections des barres.

Tableau des surfaces des sections des barres de treillis, en millimètres carrés.

NUMÉROS DES SECTIONS.	NUMÉROS CORRESPONDANTS DES PANNEAUX.	COMPOSITION D'UNE BARRE.	SECTION D'UNE BARRE.
		Sections des barres du panneau 12 à 28	m/m q.
I	28	4 corn. de 80×80×8	4864
II	27	» 80×80×8	4864
III	26	» 80×80×8	4864
IV	25	» 80×80×8	4864
V	24	» 90×90×9	6156
VI	23	» 90×90×9	6156
VII	22	» 90×90×11	7436
VIII	21	» 90×90×12	8064
IX	20	» 90×90×11	7436
X	19	» 90×90×11	7436
XI	18	» 90×90×11	7436
XII	17	» 90×90×13	8684
XIII	16	» »	8684
XIV	15	» 90×90×11	7436
XV	14	» »	7436

NUMÉROS DES SECTIONS.	NUMÉROS CORRESPONDANTS DES PANNEAUX.	COMPOSITION D'UNE BARRE.	SECTION D'UNE BARRE.
XVI	13	4 corn. de 90×90×12	8064
XVII	12	» »	8064
		Sections des barres du panneau 1 à 9	
			
XVIII	11	Ceinture du 2e étage.	
XIX	10		
XX	9	4 corn. de 80×80×9	5436
XXI	8	» »	5436
XXII	7	» »	5436
XXIII	6	» »	5436
XXIV	5	Ceinture du 1er étage.	
XXV	4	4 corn. de 100×100×12	9024
XXVI	3	» 80× 80×10	6000
XXVII	2	» »	6000
XXVIII	1	» 100×100×11	8316

CHAPITRE II

EFFETS DES CHARGES VERTICALES

§ 1. — Détermination des charges verticales.

Les charges verticales, entrant dans le calcul de l'ossature générale, comprennent uniquement le poids propre de la construction. Il est tout à fait inutile d'y faire figurer le poids des visiteurs; il n'en a été tenu compte que dans le calcul des pièces spéciales, telles que les planchers.

En effet, la violence des vents que nous avons admise pour arriver à la détermination de la résistance des divers éléments de la Tour, est telle, qu'elle rendrait le séjour de la Tour absolument impossible à tout visiteur, et d'autre part, le poids de ces visiteurs eux-mêmes donne lieu à des fatigues presque négligeables, en face de celles dues au poids propre de la construction et aux grands ouragans (1).

1° *Superstructure métallique.* — Le relevé général des bordereaux d'expédition des fers et fontes entrant dans la charpente métallique de la Tour s'élève à 7.341.214 *kg* qui comprend :

Fournitures faites par les ateliers de Levallois-Perret	6.360.067 *kg*
— par d'autres fournisseurs (rivets du montage et constructions accessoires)	981.147 *kg*
Ensemble	7.341.214 *kg*

Ce poids ne comprend pas :

Fondations. — Caissons métalliques	246.152 *kg*	
Tuyaux en fonte pour l'électricité	31.450 *kg*	
	277.602 *kg*	
Pièces mécaniques pour ascenseurs	946.000 *kg*	
Ensemble		1.223.602 *kg*
Le poids total des fers et fontes entrant dans l'ouvrage complet s'élève ainsi à		8.564.816 *kg*

Nous ne nous occuperons pour le moment que du premier de ces chiffres.

En faisant le dépouillement de tous les bordereaux d'expédition, pour en déduire le poids de la superstructure proprement dite, et en répartissant, dans chaque chapitre, le poids des rivets posés sur place, ces bordereaux se résument comme suit :

Appuis et ancrages	165.628 *kg*
Soubassements des piles	164.492
Charpente spéciale dans la pile 3	42.831
Poutres de support des cylindres de l'ascenseur Otis	56.461
Superstructure métallique proprement dite	6.911.802
Ensemble	7.341.214 *kg*

(1) La surface maxima des plates-formes pouvant être occupée par les visiteurs est, à la troisième plate-forme, de 272 m^2, à la deuxième, de 1.058 m^2, à la première, de 3.878 m^2, soit ensemble, 5.208 m^2. A raison de deux personnes par mètre carré, 10.416 visiteurs peuvent se trouver ensemble dans les différentes parties de la Tour; ce nombre, d'ailleurs, ne s'est pas encore réalisé. Le poids total des visiteurs, comptés à 70 *kg* en moyenne, est, au maximum, de 729 tonnes, lequel, comparé au poids propre, qui sera déterminé plus loin, et qui est de 9.700 tonnes, n'augmente les coefficients de travail dûs aux charges, que de 7.4 p. 100.

En admettant même que cette foule puisse exister dans la Tour, non pendant un grand ouragan, mais tout au moins avec un vent violent ayant une intensité de pression par mètre carré de 100 *kg* au sol et de 300 *kg* au sommet (voir pages 45 et suivantes), le coefficient maximum de travail, qui est de 10,11 *kg*, dont 8,04 *kg* pour l'effet des charges et 2,07 *kg* pour l'effet du vent, s'augmente de $0{,}074 \times 8{,}04 = 0{,}59$ et devient 10,70 *kg*. Or, sous l'effet du vent admis dans le calcul, la même section (XXVI, arbalétrier C) travaille au même point à un coefficient de 11,9 *kg* (voir page 41), lequel est supérieur au précédent. Il n'y a donc pas lieu de faire intervenir ces surcharges.

Cette influence n'existe d'ailleurs que sur les sections au-dessous du premier étage, et elle est sensiblement nulle sur les sections de la partie en dessus.

Le poids de la superstructure elle-même se décompose comme suit :

DÉSIGNATION.	OSSATURE DES MONTANTS.	POUTRES DES ASCENSEURS, PASSERELLES ET ESCALIERS.	PLANCHERS ET DIVERS.	TOTAUX.	HAUTEUR.	POIDS PAR MÈTRE COURANT.
	kg	*kg*	*kg*	*kg*	*m.*	*kg*
Panneaux 1 à 4	1.315.091	255.857	»	1.570.948	47.90	32.800
Arcs et poutres décoratives	770.247	»	»	770.247		16.100
Panneau 5, galerie et 1er plancher	305.020	95.794	1.111.795	1.512.609	7.00	216.087
Panneaux 6 à 10	1.033.900	149.304	»	1.213.204	53.20	22.785
Panneau 11 et 2e plancher	190.952	99.956	192.047	482.955	4.90	98.560
Panneaux 12 à 18	657.479	37.885	»	695.364	73.60	9.447
Panneau 19 et plancher intermédiaire	47.678	»	44.976	92.654	9.60	9.651
Panneaux 20 à 28	324.101	65.200	»	389.301	66.20	5.879
Panneau 29 et 3e plancher	78.572	»	37.042	115.614	11.22	10.322
Campanile	68.816	»	»	68.816	24.38	2.831
Totaux	4.821.856	704.086	1.385.860	6.911.802	298.00	Poids moyen. 23.193 *kg*

Les chiffres de ce tableau se résument dans le suivant :

DÉSIGNATION.	OSSATURE.	POUTRES DES ASCENSEURS, PASSERELLES ET ESCALIERS.	PLANCHERS ET DIVERS.	TOTAUX.	HAUTEUR.	POIDS PAR MÈTRE COURANT.
	kg	*kg*	*kg*	*kg*	*m.*	*kg*
Du sol au 1er plancher	2.390.358	351.651	1.111.795	3.853.804	54.90	70.196
Du 1er au 2e	1.254.852	249.260	192.047	1.696.159	58.10	29.200
Du 2e au 3e	1.107.830	103.175	82.018	1.293.023	160.62	8.060
Campanile	68.816	»	»	68.816	24.38	2.831
Totaux	4.821.856	704.086	1.385.860	6.911.802	298.00	Poids moyen. 23.193 *kg*

Les poids qui, en dehors de la superstructure métallique proprement dite, devront entrer dans les calculs, sont ceux des mécanismes et accessoires des ascenseurs, ainsi que ceux des bâtiments et du sous-sol des plates-formes. Nous allons les étudier séparément.

2° *Ascenseurs.* — Ils ont les poids suivants, qui seront détaillés dans le chapitre qui leur sera consacré :

DÉSIGNATION	MÉCANISMES, TUYAUX ET RÉSERVOIRS.	EAU.	TOTAUX.
	t	*t*	*t*
Ascenseurs Otis	365	96,5	461,5
» Roux-Combaluzier	397	80,5	477,5
» Edoux	184	73,1	257,1
Totaux	946	250,1	1.196,1

En analysant la répartition de ces diverses charges suivant les différentes parties de la Tour, on arrive au tableau ci-dessous :

DÉSIGNATION.	ASCENSEURS OTIS.	ASCENSEURS ROUX-COMBALUZIER.	ASCENSEUR ÉDOUX.	TOTAUX.
	kg	*kg*	*kg*	*kg*
Panneaux 1 à 4	237.722	196.923	10.400	445.045
» 5	5.695	49.744	»	55.439
» 6 à 10	72.263	27.084	11.600	110.947
» 11	137.405	52.941	19.460	209.806
» 12 à 18	»	»	15.844	15.844
» 19	»	»	95.335	95.335
» 20 à 28	»	»	9.500	9.500
» 29	»	»	41.200	41.200
Campanile	»	»	53.661	53.661
Total porté par la Tour	453.085	326.692	257.000	1.036.777
» porté par le sol	8.415	150.808	»	159.223
Total égal au précédent	461.500	477.500	257.000	1.196.100

3° *Installations diverses et plates-formes.* — *a.* Dans le campanile, le pavillon supérieur comporte :

Plancher général en madriers	121	m^2 à	70 *kg*	8.470 *kg*
Sept cloisons de 11 × 2,27 *m*	175	» »	30	8.750
Couvertures en zinc	275	» »	25	6.850
Phare et lanterne				10.000
Total pour le campanile				34.070 *kg*

b. Dans le panneau 29 et le troisième étage, il y a lieu de compter :

Plancher général de 16,6 × 16,6 *m*	272	m^2 à	70 *kg*	19.040 *kg*
Cloisons extérieures de 59,6 × 2,43 *m*	145	» »	50	7.250
Boutiques et aménagements				7.000
Total pour le panneau 29				33.290 *kg*

c. Dans le panneau 19 et le plancher intermédiaire, il n'y a lieu de compter que le plancher et les cloisons de la chambre du machiniste, dont le poids est de 2.600 *kg*.

d. Pour le panneau 11 et la deuxième plate-forme nous prendrons :

Couverture de la galerie, 4 × 34 × 2,8 *m*	380	m^2 à	30 *kg*	11.400 *kg*
52 mâts		»	70	3.640
Chéneau 4 × 36,85 *m*	147,4	*m*	» 50	7.370
Garde-corps	147,4	»	» 50	7.370
Abris couverts, bar, water-closets et boutiques	244	m^2	» 100	28.840
Plancher de la galerie en bois asphalté (asphalte 48 *kg*, bois 27 *kg*)	326	»	» 75	24.450
Sol de la plate-forme (primitivement formé par un plancher en bois asphalté, sur un hourdis Perrière, pesant 70 *kg*. Depuis, le plancher a été remplacé par du ciment Coignet)	722.4	»	» 200	144.480
Total pour le panneau 11				225.550 *kg*

e. Dans le panneau 5 et la première plate-forme, se trouvent les poids les plus importants :

Couverture de la galerie	1.032	m^2 à	30 *kg*	48.960 *kg*
Mâts	36	»	» 100	3.600
Arcades	36	»	» 2.000	72.000
Ecussons	72	»	» 150	10.800
Chéneau	280	*m*	» 50	14.000
Garde-corps extérieur	280	»	» 150	42.000
Surface avec hourdis Perrière et ciment	1.515	m^2	» 200	303.000
» des galeries avec plancher asphalté	708	»	» 75	53.100
» des restaurants, avec parquets sur lambourdes et hourdis	1.543	»	» 140	216.020
» des caves sous les restaurants, avec plancher asphalté et hourdis	480	»	» 145	69.600
» des cloisons des caves, et des cuisines	1.210	»	» 50	60.500
Charge dans les caves	242	»	» 400	97.000
Réservoirs d'alimentation des restaurants	4	»	» 2.500	10.000
Planchers et escaliers d'accès des ascenseurs				4.000
Baraques de vente et de billets	16	»	» 1.500	24.000
Restaurants y compris mobilier	4	»	» 90.000	360.000
Installations diverses, water-closets, etc				66.821
Total pour le panneau 5				1.455.401 *kg*

Les charges dues aux installations diverses et aux plates-formes, sont donc :

Panneau 5 et 1re plate-forme	1.455.401 *kg*
» 11 et 2e »	225.550
» 19 et plancher intermédiaire	2.600
» 29 et 3e plate-forme	33.290
Campanile	34.070
Total	1.750.911 *kg*

L'ensemble des charges verticales agissant dans les différents panneaux est résumé dans le tableau suivant :

DÉSIGNATION.	SUPERSTRUCTURE.	ASCENSEURS.	INSTALLATIONS.	TOTAUX.	HAUTEUR.	CHARGE PAR MÈTRE COURANT.
Panneaux 1 à 4	2.341.195 *kg*	445.045 *kg*	»	2.786.240 *kg*	47.90 *m*.	58.170 *kg*
Panneau 5 et 1re plate-forme	1.512.609	55.439	1.455.401	3.023.449	7.00	431.920
Panneaux 6 à 10	1.213.204	110.947	»	1.324.151	53.20	24.890
Panneau 11 et 2e plate-forme	482.955	209.806	225.550	918.311	4.90	187.400
Panneaux 12 à 18	695.364	15.844	»	711.208	73.60	9.663
Panneau 19 et plancher intermédiaire	92.654	95.335	2.600	190.589	9.60	19.853
Panneaux 20 à 28	389.391	9.500	»	398.891	66.20	6.025
Panneau 29 et 3e plate-forme	115.614	41.200	33.290	190.104	11.22	16.973
Campanile	68.816	53.661	34.070	156.547	24.38	6.442
Totaux	6.911.802	1.036.777	1.750.911	9.699.490	298.00	32.500 *kg*

Cette charge de 9.700 tonnes, qui est le poids total de la Tour, est celle adoptée dans les calculs. Le poids des panneaux intermédiaires non spécifiés se déduit de leur hauteur, et du poids par mètre courant correspondant.

§ 2. — Observations sur les poids de la partie métallique.

Si on prend, dans les tableaux précédents, le poids de l'ossature seule, c'est-à-dire le poids des montants et celui des poutres de ceinture, déduction faite des planchers et des poutres d'ascenseurs, ces poids sont les suivants :

DÉSIGNATION.	POIDS TOTAUX	HAUTEUR.	POIDS PAR MÈTRE COURANT.
Panneaux 1 à 4, compris poutres décoratives	2.085.338 *kg*	47.90 *m*.	43.535 *kg*
Panneau 5	305.020	7.00	43.700
Panneaux 6 à 10	1.063.900	53.20	20.100
Panneau 11	190.952	4.90	38.800
Panneaux 12 à 18	657.479	73.60	7.560
Panneau 19	47.678	9.60	4.980
Panneaux 20 à 28	321.101	66.20	4.830
Panneau 29	78.572	11.22	7.000
Campanile	68.816	24.38	2.830

Les poids de la superstructure métallique, donnés précédemment, peuvent être résumés dans le diagramme ci-contre, dans lequel les parties hachées représentent les quantités de métal employées dans la Tour. La courbe en traits pleins se rapporte aux poids par mètre courant, relatifs à la construction dans son ensemble. Celle en traits mixtes est relative à l'ossature des montants, y compris les poutres des ceintures, déduction faite des planchers et des ascenseurs.

On voit que ces poids augmentent très rapidement avec la hauteur.

On peut en induire ce qu'eût été le poids approximatif de la Tour si elle avait été prolongée de 50 *m*, c'est-à-dire si on lui avait donné une hauteur de 350 *m*.

Le poids des panneaux 1 à 4, sans les poutres décoratives, et pour une hauteur de 47.90 *m* à partir des appuis, est de 1.315.091 *kg*, soit par mètre courant 27.500 *kg*.

Celui des panneaux 6 à 10, est, pour une hauteur de 53,20 *m* de 1.063.900 *kg*, soit par mètre courant 20.100 *kg*.

Il s'en suit que si la Tour avait eu une hauteur de 50 *m* en plus, c'est-à-dire, si on avait adapté à la partie inférieure un étage de 50 *m*, la largeur à la base eût été de 150 *m* environ, et le poids de cet étage eût été, comme ossature des montants, de 35.000 *kg* par mètre courant environ.

Le poids supplémentaire correspondant est de $35.000 \times 50 = 1.750.000$ *kg*.

Quant au poids des poutres nouvelles des ceintures et du panneau à cette nouvelle hauteur, il eût été d'environ $43.700 \times \frac{100}{53} = 82.500$ *kg*, ce qui, pour une hauteur de 10 *m*, donne 825.000 *kg*, non compris les planchers, ascenseurs, etc.

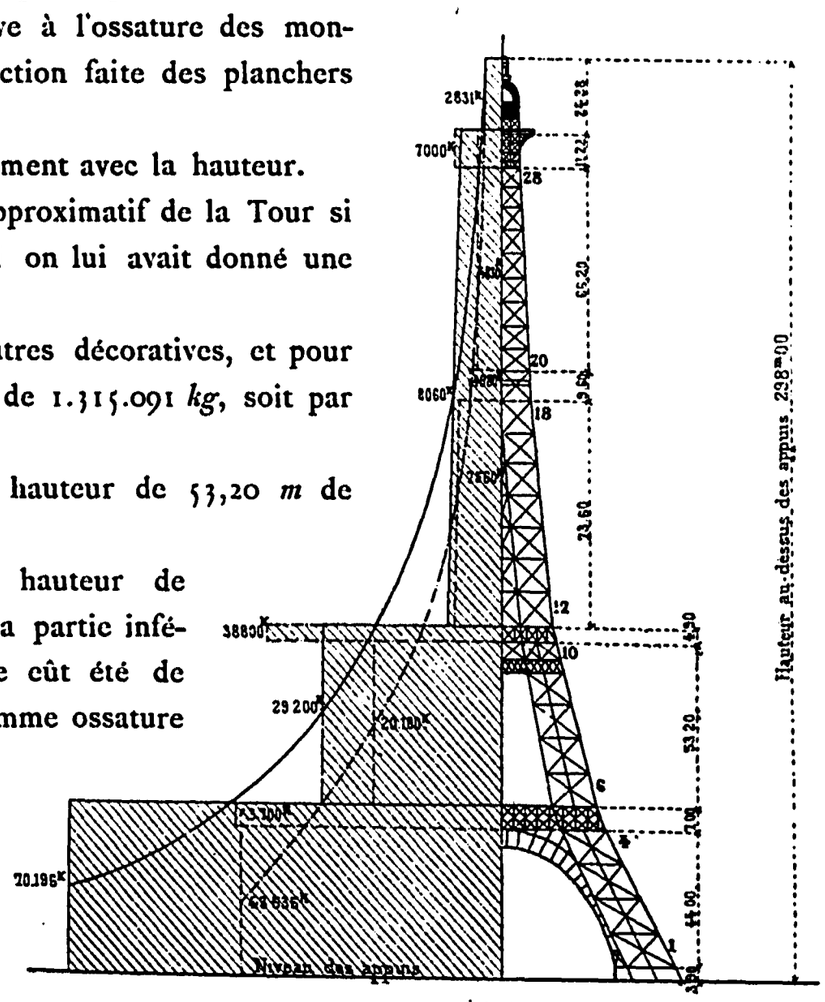


Diagramme des poids par mètre courant { *Échelle des longueurs 0m0005 par mètre.* / *Échelle des poids 0m001 par tonne.*

Le poids total de l'étage surajouté eût donc été, au minimum, de 1.750.000 + 825.000 = 2.575.000 *kg*.

Le poids comparatif de la construction est celui de l'ossature des montants.....	4.821.856 *kg*.
moins celui des poutres décoratives » »	770.247
Reste.....	4.051.609

Ainsi, pour une augmentation de hauteur de $\frac{50}{300} = 17$ p. 100, le poids augmenterait de $\frac{2.575.000}{4.051.000} = 63{,}5$ p. 100.

Cela rend manifeste, qu'à moins d'une augmentation considérable dans la dépense, que nous n'évaluons pas à moins de 3 millions, tout compris, il eût été difficile de dépasser notablement la hauteur à laquelle on s'est arrêté.

§ 3. — Charges verticales agissant dans les sections.

Des tableaux qui précèdent, on peut déduire la charge due à chacun des panneaux, en y appliquant, proportionnellement à leur hauteur, la charge par mètre courant relative aux diverses catégories admises.

Ces charges sont les suivantes :

Campanile.....	156.547 *kg*.
Panneau 29 et 3e étage.....	190.104
» 28	35.143
» 27	37.144
» 26	39.265
» 25	41.580
» 24	43.862
» 23	46.362
» 22	49.001
» 21	51.791
» 20	54.743
» 19 et plancher intermédiaire.....	190.589
» 18	96.630
» 17	96.630
» 16	101.461
» 15	101.461
à reporter.....	1.332.313

Report.....	1.332.313 *kg*.
Panneau 14.....	102.127
» 13.....	103.374
» 12.....	109.525
» 11 et 2e étage.....	918.311
» 10.....	248.900
» 9.....	253.878
» 8.....	273.790
» 7.....	273.790
» 6.....	273.793
» 5 et 1er étage.....	3.023.449
» 4.....	696.560
» 3.....	696.560
» 2.....	696.560
» 1.....	696.560
Total.....	9.699.490 *kg*.

Quoique les calculs de la Tour aient été faits avec le poids total ci-dessus, des différences dans la répartition des charges, notamment en ce qui concerne les ascenseurs, laquelle n'avait pas été faite avec l'exactitude que nous y avons apportée depuis, avaient conduit à des chiffres un peu différents, pour les charges dans chaque section. Nous avons néanmoins jugé tout à fait inutile, en raison de ces différences, de faire à nouveau ces laborieux calculs, par la raison que ces différences partielles sont sans aucune influence appréciable sur la valeur des coefficients de travail. Elles n'ont par elles-mêmes quelque importance que dans la partie supérieure de la Tour. Or, on verra plus loin que dans cette partie, l'influence du vent est de beaucoup prédominante sur celle des charges ; de plus, dans les panneaux 12, 13 et 14, où le coefficient total de travail est assez élevé, l'influence des différences signalées peut être considérée comme tout à fait nulle (voir tableaux, pages 22 et 44).

Nous pouvons donc, sans aucun inconvénient, conserver les charges ci-dessous primitivement adoptées pour chacune des 28 sections; chacune de ces charges s'obtient en faisant la somme des poids des panneaux situés au-dessus de la section considérée.

Section I. — Campanile.....	129.050	*Kilos.*
Panneau 29 et plancher du 3me étage.....	153.350	
Panneau 28.....	35.004	
Charge verticale.....		318.004
Section II. — Comme pour la section I.....	318.004	
Panneau 27.....	36.996	
Total.....		355.000
Section III. — Comme pour la section II.....	355.000	
Panneau 26.....	39.102	
Total.....		394.102
Section IV. — Comme pour la section III.....	394.102	
Panneau 25.....	41.328	
Total.....		435.430
Section V. — Comme pour la section IV.....	435.430	
Panneau 24.....	43.680	
Total.....		479.110
Section VI. — Comme pour la section V.....	479.110	
Panneau 23.....	46.170	
Total.....		525.280

Section VII. — Comme pour la section VI.....	525.280			*Section XVIII.* — Comme pour la section XVII.....	1.636.580		
Panneau 22.....	48.798			Panneau 11, plancher du 2e étage.....	1.166.210		
Total.....		574.078		Total.....		2.802.790	
Section VIII. — Comme pour la section VII.....	574.078			*Section XIX.* — Comme pour la section XVIII.....	2.802.790		
Panneau 21.....	51.582			Panneau 10.....	216.330		
Total.....		625.660		Total.....		3.019.120	
Section IX. — Comme pour la section VIII.....	625.660			*Section XX.* — Comme pour la section XIX.....	3.019.120		
Panneau 20.....	54.520			Panneau 9.....	220.260		
Total.....		680.180		Total.....		3.239.780	
Section X. — Comme pour la section IX.....	680.180			*Section XXI.* — Comme pour la section XX.....	3.239.780		
Panneau 19.....	183.600			Panneau 8.....	237.970		
Total.....		863.780		Total.....		3.477.750	
Section XI. — Comme pour la section X.....	863.780			*Section XXII.* — Comme pour la section XXI.....	3.477.750		
Panneau 18.....	105.000			Panneau 7.....	237.970		
Total.....		968.780		Total.....		3.715.720	
Section XII. — Comme pour la section XI.....	968.780			*Section XXIII.* — Comme pour la section XXII.....	3.715.720		
Panneau 17.....	105.000			Panneau 6.....	237.970		
Total.....		1.073.780		Total.....		3.953.690	
Section XIII. — Comme pour la section XII.....	1.073.780			*Section XXIV.* — Comme pour la section XXIII.....	3.953.690		
Panneau 16.....	110.250			Panneau 5 et plancher du 1er étage.....	2.959.000		
Total.....		1.184.030		Total.....		6.912.690	
Section XIV. — Comme pour la section XIII.....	1.184.030			*Section XXV.* — Comme pour la section XXIV.....	6.912.690		
Panneau 15.....	110.250			Panneau 4.....	999.200		
Total.....		1.294.280		Total.....		7.911.890	
Section XV. — Comme pour la section XIV.....	1.294.280	*Kilos.*		*Section XXVI.* — Comme pour la section XXV.....	7.911.890		
Panneau 14.....	111.300			Panneau 3.....	699.200		
Total.....		1.405.580		Total.....		8.611.090	
Section XVI. — Comme pour la section XV.....	1.405.580			*Section XXVII.* — Comme pour la section XXVI....	8.611.090		
Panneau 13.....	112.350			Panneau 2.....	544.200		
Total.....		1.517.930		Total.....		9.155.290	
Section XVII. — Comme pour la section XVI.....	1.517.930			*Section XXVIII.* — Comme pour la section XXVII...	9.155.290		
Panneau 12.....	118.650			Panneau 1.....	544.200		
Total.....		1.636.580		Total.....		9.699.490	

§ 4. — Calcul de la partie supérieure.

Dans la partie supérieure, au-dessus du second étage, les arbalétriers sont presque verticaux et l'influence de leur inclinaison est insensible. Nous obtenons directement le coefficient de travail R en divisant l'effort total P des charges situées au-dessus de la section considérée par la surface totale Ω de tous les arbalétriers coupés, c'est-à-dire que l'on a $R = \frac{P}{\Omega}$.

Le tableau suivant résume ces efforts qui varient de $1^k,5$ à $2^k,6$, laissant ainsi la marge nécessaire pour la résistance au vent dont l'action est prépondérante dans cette partie de la Tour.

NUMÉROS DES SECTIONS.	SURFACE TOTALE DE LA SECTION. Ω	CHARGE VERTICALE.	COEFFICIENT DU TRAVAIL.
	m/m²		k.
I.....	208.672	318.004 k.	1,5
II.....	236.672	355.000	1,5
III.....	236.672	394.102	1,65
IV.....	236.672	435.430	1,8
V.....	236.672	479.110	2,0
VI.....	236.672	525.280	2,2
VII.....	236.672	574.078	2,4
VIII.....	300.672	625.660	2,1
IX.....	300.672	680.180	2,25

NUMÉROS DES SECTIONS.	SURFACE TOTALE DE LA SECTION. Ω	CHARGE VERTICALE.	COEFFICIENT DU TRAVAIL.
	m/m²		k.
X.....	312.672	863.780 k.	2,75
XI.....	403.372	968.780	2,4
XII.....	471.684	1.073.780	2,25
XIII.....	471.684	1.184.030	2,5
XIV.....	551.684	1.294.280	2,35
XV.....	591.684	1.405.580	2,4
XVI.....	591.684	1.517.930	2,55
XVII.....	591.683	1.636.580	2,6

§ 5. — Calcul de la partie inférieure. — Méthode employée.

Nous ferons le calcul pour chaque montant pris isolément. Les poids totaux des différents panneaux de la Tour que nous avons déterminés plus haut P_1 P_2... se répartissent également entre ces 4 montants : les poids dont nous nous servirons dans nos calculs, sont les poids $p_1 = \frac{P_1}{4}$, $p_2 = \frac{P_2}{4}$..... appliqués aux centres de figure des panneaux, centres dont l'ensemble constitue la fibre moyenne.

La force extérieure à une section est la résultante de toutes les charges verticales et de tous les efforts horizontaux agissant au-dessus de la section. La composante verticale de cette force est égale aux charges; la composante horizontale résulte de l'action des ceintures à la 1re et à la 2e plate-forme. Nous ferons tout d'abord le calcul *comme si le système était articulé* aux points α, β, points de rencontre des ceintures avec la fibre moyenne (fig. 1).

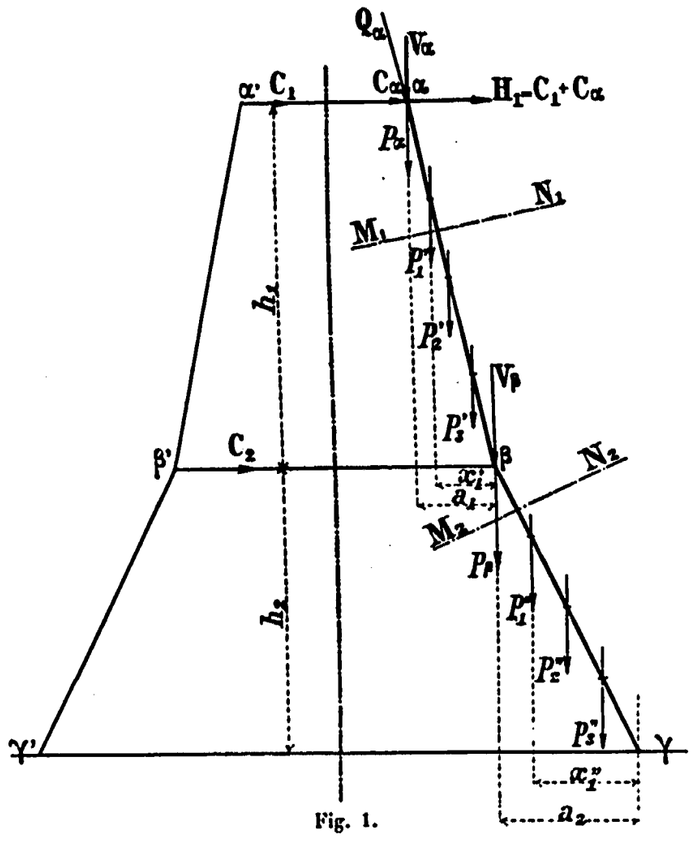


Fig. 1.

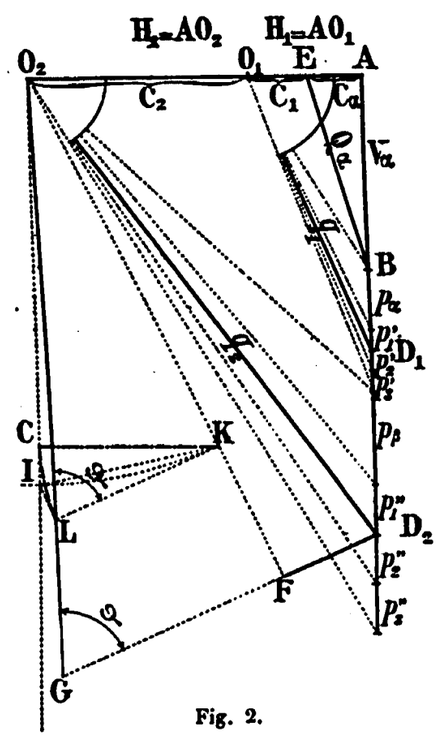


Fig. 2.

Soit Q_α, la résultante des forces qui agissent sur le montant au-dessus de la ceinture $\alpha\alpha'$; elle passe, d'après l'hypothèse admise, par le point α de la fibre moyenne et se trouve dans la direction de l'élément au-dessus de la ceinture.

Soient V_α et C_α, ses composantes verticale et horizontale.

$p_\alpha = \frac{P_\alpha}{4}$, le quart du poids total du plancher du 2e étage situé sur la ceinture $\alpha\alpha'$.

C_1 l'effort dans la ceinture $\alpha\alpha'$.

a_1 l'écartement horizontal des points α, β.

x'_1 x'_2 x'_3... les distances horizontales du point β aux points d'application des charges p'_1 p'_2 p'_3... agissant sur le montant entre les deux ceintures.

h_1 la distance verticale des ceintures α et β.

Enfin H_1 la résultante des forces horizontales agissant au point α et dont la valeur est $H_1 = C_\alpha + C_1$.

Pour avoir la valeur de H_1, il suffit, comme le montant αβ est en équilibre, d'égaler le moment des forces verticales extérieures par rapport au point β, à celui de la résultante horizontale pris par rapport à ce même point, ce qui donne $H_1 h_1 = (V_\alpha + p_\alpha)\, a_1 + p'_1 x'_1 + p'_2 x'_2 + \ldots\ldots$ d'où nous tirons $H_1 = \frac{1}{h_1}[(V_\alpha + p_\alpha)\, a_1 + p'_1 x'_1 + p'_2 x'_2 + \ldots\ldots]$ expression dans laquelle tous les éléments sont connus.

On aurait de même pour la partie $\beta\gamma$, $H_2 = \frac{1}{h_2}[(V_\beta + p_\beta) a_2 + p'_1 x'_1 + p'_2 x'_2 \ldots]$ dans laquelle V_β représente la somme de toutes les forces verticales agissant au-dessus de la ceinture $\beta\beta'$.

p_β le quart du poids du plancher du 1er étage situé sur la ceinture $\beta\beta'$.

p''_1 p''_2..... les charges sur le montant au-dessous de la ceinture $\beta\beta'$.

x''_1 x''_2..... leurs bras de levier par rapport au point γ.

a_2 l'écartement horizontal des points β et γ.

h_2 l'écartement des ceintures β et γ.

Connaissant H_1 et H_2, on peut construire les polygones des forces, dont l'un, de distance polaire $AO_1 = H_1$, s'appliquera à la partie $\alpha\beta$; l'autre, de distance polaire $AO_2 = H_2$, à la partie $\beta\gamma$ (fig. 2).

Pour une section quelconque M_1N_1, comprise entre les ceintures $\alpha\alpha'$ et $\beta\beta'$, la force extérieure q_1 est égale au rayon O_1D_1 qui part du pôle O_1 et passe par le point D_1 de séparation des forces p'_1 et p'_2 entre lesquelles se trouve la section M_1N_1.

Pour une section M_2N_2, faite au-dessous de la ceinture $\beta\beta'$, la force extérieure est donnée par le rayon O_2D_2 qui part du pôle O_2 et aboutit au point D_2 situé entre les forces p'_1 et p''_2.

La distance des pôles O_1 et O_2 est égale à l'effort de compression C_2 de la ceinture $\beta\beta'$ qui a pour valeur $H_2 - H_1$.

Quant aux forces C_2 et C_1, la première se détermine en menant par l'extrémité B de la ligne $AB = V_2$ une parallèle à l'élément au-dessus de la ceinture : AE est cette force. — Par suite, O_1E est la force C_1 et $EB = Q_2$.

Ayant les forces extérieures telles que q_1, q_2, on obtiendra les efforts de compression et les efforts tranchants en décomposant chacune d'elles en deux forces : l'une parallèle à la fibre moyenne dans la section considérée et l'autre normale à cette direction.

L'effort de compression ainsi obtenu est celui qui agit dans le plan vertical, il doit être ramené dans le plan du montant et décomposé suivant l'inclinaison du montant en rabattement.

Cette décomposition est indiquée dans la figure pour la force extérieure $q_2 = O_2D_2$ de la section M_2N_2; on obtient d'abord, en traçant la ligne O_2F parallèle à la fibre moyenne et en abaissant la perpendiculaire D_2F, un effort tranchant D_2F et un effort de compression O_2F agissant dans le plan vertical. Pour le ramener dans le plan de la face, on opère le rabattement comme suit (fig. 3) :

Du pôle O_2 comme centre on trace un arc de cercle allant du point I situé sur la verticale du pôle au point K sur O_2F. Du point K on élève une perpendiculaire KL à O_2F et du point I une perpendiculaire IL à KL. Le point L est l'intersection de ces deux lignes. O_2L est la direction cherchée de la force suivant le plan du montant.

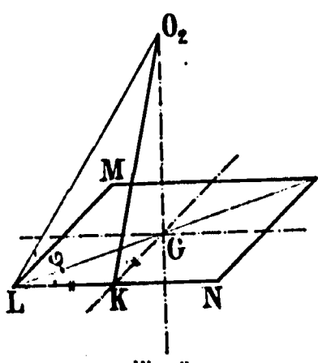


Fig. 3.

En effet : MN étant un plan horizontal, pour avoir O_2L connaissant O_2K, il suffit d'avoir la longueur $KL = KC$ et de la porter sur une perpendiculaire à O_2K élevée au point K. Pour avoir KC il faut abaisser du point K une perpendiculaire sur la verticale O_2C.

En ramenant la longueur obtenue sur la direction KL, on a le point L cherché que l'on peut obtenir également par la construction indiquée dans l'épure (fig. 2), parce que dans le triangle ILK obtenu en menant les perpendiculaires KL et IL, on a $KL = KC$.

En projetant la force O_2F normalement à sa direction sur la direction O_2L, on obtient finalement la force O_2G qui est l'effort de compression réel du montant. Cette force N donne, dans chacun des 4 arbalétriers, a, b, c, d du montant, un effort $E_1 = \frac{N_2}{4}$.

Quant à l'effort tranchant FD_2, il sera reporté sur une ligne normale à la fibre moyenne et décomposé suivant la direction des barres de treillis correspondantes, ce qui donnera les efforts dans chacune d'elles pour l'ensemble des deux faces.

En réalité, le système que nous avons étudié n'est pas articulé, *il est au contraire encastré à la base* γ *ainsi qu'aux points* α, β par suite de la continuité du montant, et nous allons tenir compte de cette continuité dans le calcul des moments fléchissants dus à l'inclinaison des montants et à l'action des charges verticales agissant contre les points d'appui que forment les ceintures.

Nous remarquerons d'abord que la première hypothèse qui nous a servi à la détermination des forces ne change en rien la valeur absolue des efforts de compression et des efforts tranchants réels : elle correspond seulement à un déplacement de la courbe des pressions réelles parallèlement à elle-même.

La courbe des pressions réelles pourra être tracée avec le même polygone des forces que celui fig. 2.

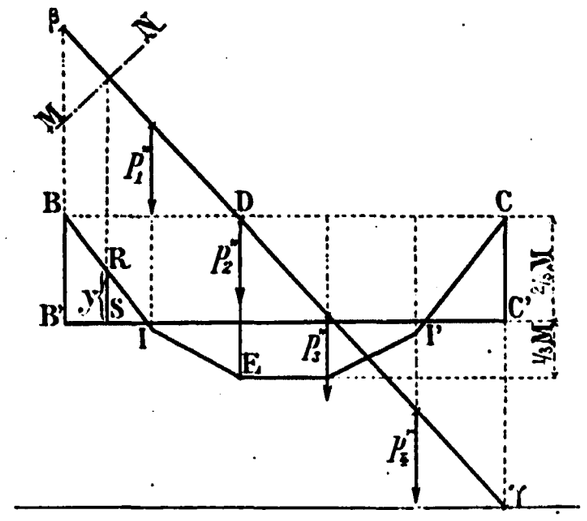


Fig. 4.

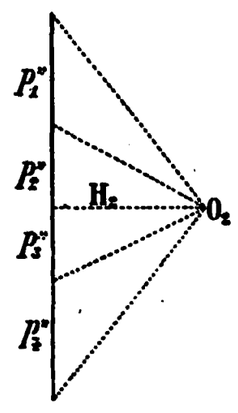


Fig. 5.

En considérant la partie βγ, on peut tracer le polygone funiculaire BEC (fig. 4) correspondant au polygone des forces p_1' p_2'' p_3'' p_4'' qui agissent sur la partie βγ.

On sait d'autre part que si M est le moment maximum d'une poutre uniformément chargée et reposant librement sur ses appuis, les moments de la même poutre encastrée à chacune de ses extrémités sont de :

2/3 M sur les appuis et 1/3 M au milieu de la travée.

D'après notre hypothèse d'encastrement, nous avons donc en β et γ des moments d'encastrement BB' = CC' égaux aux 2/3 du moment maximum DE, qui se produirait si le montant était articulé en β et γ.

Les moments sont représentés en un point quelconque par les ordonnées du polygone funiculaire mesurées à partir de la ligne B'C' parallèle à BC et distante verticalement de celle-ci des 2/3 du moment DE. Ils sont positifs dans les parties B'I et I'C' et sont négatifs entre les points I et I'.

Pour une section MN, le moment est égal à $\mu_x = RS \times H_2 = yH_2$.

On calculera de la même manière les moments fléchissants dus au poids propre dans la partie αβ du montant comprise entre la deuxième et la première plate-forme.

Le moment μ_x ainsi déterminé agit dans le plan vertical XY. Il est produit par l'inclinaison α_x de la projection du montant sur ce plan.

On a de même dans le plan vertical UZ, perpendiculaire à XY, un moment qui est dû à l'inclinaison du montant suivant la direction UZ.

Les inclinaisons α_x étant les mêmes dans les deux sens XY et UZ, ces deux moments sont égaux.

Pour obtenir les couples correspondants qui agissent dans les faces du montant, il faut décomposer ces deux couples μ_x suivant l'inclinaison des faces.

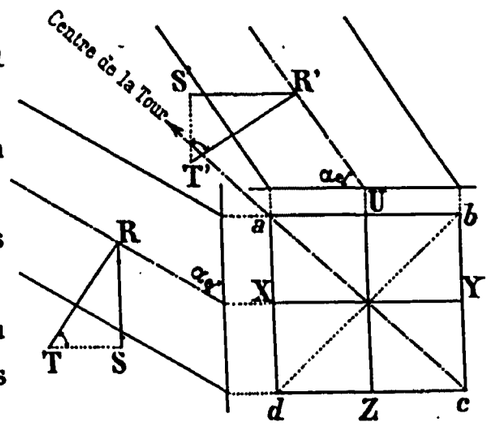


Fig. 6.

Soient RS, l'axe représentatif du moment μ_x dans le plan XY (1), R'S', l'axe représentatif de ce même moment dans le plan UZ. Pour les composer entre eux, nous décomposerons chacun d'eux suivant la verticale et suivant une normale à la fibre moyenne, ST et $RT = \frac{\mu_x}{\sin \alpha_x}$, S'T' et

(1) On sait que l'axe représentatif d'un moment (fig. 7) est une ligne perpendiculaire au plan du moment, élevée du côté du plan tel que, si l'on place l'œil à son origine A et qu'on regarde dans la direction AB, le moment tourne par rapport à cette ligne dans le sens des aiguilles d'une montre. Sur cette perpendiculaire, on porte une longueur AB proportionnelle au moment, laquelle est l'axe représentatif.

Par cette définition, l'œil placé à l'extrémité de l'axe représentatif verra le moment positif tourner dans le sens inverse des aiguilles d'une montre et cette conception est quelquefois plus facile. La ligne ainsi définie représente bien le moment, puisqu'elle définit son plan, son intensité et le sens de la rotation qu'il tend à produire. On sait, en outre, que ces axes se composent entre eux, comme les forces, ce qui donne un moyen simple d'effectuer la composition ou la décomposition des moments.

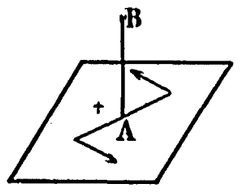


Fig. 7.

$R'T' = \frac{\mu_e}{\sin \alpha_e}$. Les composantes verticales ST, S'T', étant égales et de signe contraire s'annulent; les composantes normales RT, R'T' subsistent seules.

Le moment RT produit dans les parois *ab* et *dc*, pour des valeurs positives du moment, un effort de compression sur les arbalétriers *a* et *d* et une tension dans les arbalétriers *b* et *c*.

De même le moment R'T', dans le plan vertical UZ, produit dans les parois *ad* et *bc* un effort de compression pour les arbalétriers *a* et *b* et une tension pour les arbalétriers *d* et *c*.

En désignant par E', l'effort dans les arbalétriers, et *i*, leur écartement, $\frac{\mu_e}{\sin \alpha_e}$ étant le moment relatif à l'ensemble des deux faces *ab* et *dc*, on a pour l'une d'elles $E'i = \frac{1}{2} \frac{\mu_e}{\sin \alpha_e}$ d'où $E' = \frac{1}{2i} \frac{\mu_e}{\sin \alpha_e}$.

Cet effort E' donne une compression sur les arbalétriers *a* et *d* et une tension sur les arbalétriers *b* et *c*.

On aurait de même pour les faces *ad* et *bc*, l'effort $E'' = \frac{1}{2i} \frac{\mu_e}{\sin \alpha_e}$ qui donne une compression sur les arbalétriers *a* et *b* et une tension sur les arbalétriers *d* et *c*.

Les efforts totaux de compression seront donc : pour l'arbalétrier *a* $E_a = \frac{\mu_e}{i \sin \alpha_e}$.

et les efforts totaux de tension : pour l'arbalétrier *c* $E_c = -\frac{\mu_e}{i \sin \alpha_e}$.

Pour les arbalétriers *b* et *d*, les efforts s'annulent.

Les efforts totaux produits dans les arbalétriers de la partie inférieure par l'effet des charges verticales, en tenant compte des moments fléchissants est ainsi :

pour l'arbalétrier *a* un effort de $E_a = E_1 + E_2$.
— *c* — $E_c = E_1 - E_2$.
— *b* ou *d* — $E_{b,d} = E_1$.

§ 6. — Partie inférieure. — Calculs numériques.

Il faut d'abord déterminer les valeurs de H_1 et H_2, c'est-à-dire les forces horizontales agissant au droit des ceintures.

Les tableaux ci-dessous en donnent les calculs.

Calcul de la poussée horizontale H_1 due aux charges verticales entre les ceintures du premier et du second étage.

DÉSIGNATION DES CHARGES VERTICALES.	POIDS TOTAUX CORRESPONDANT AUX 4 MONTANTS. *k.*	POIDS PAR MONTANT. *k.*	BRAS DE LEVIER PAR RAPPORT AU POINT β DE LA FIBRE MOYENNE ET DE LA CEINTURE DU 1er ÉTAGE. *m.*	MOMENTS. *m.k.*
Charge agissant dans la section XVII au-dessus de la ceinture du second étage.....	1.636.580	$V_e = 409.145$		
Poids de la ceinture du 2me étage (Panneau 11)....	1.166.210	$p_e = 291.552$		
Total.....	2.802.790	$V_e + p_e = 700.697$	$a_1 = 12^m,623$	$(V_e + p_e)a_1 = 8.592.647$
Poids du panneau 10.....	216.330	$p'_1 = 54.083$	$x'_1 = 11^m,306$	$p'_1x'_1 = 611.462$
» 9.....	220.660	$p'_2 = 55.165$	$x'_2 = 9^m,348$	$p'_2x'_2 = 515.682$
» 8.....	237.970	$p'_3 = 59.493$	$x'_3 = 7^m,148$	$p'_3x'_3 = 425.260$
» 7.....	237.970	$p'_4 = 59.493$	$x'_4 = 4^m,598$	$p'_4x'_4 = 273.549$
» 6.....	237.970	$p'_5 = 59.493$	$x'_5 = 1^m,625$	$p'_5x'_5 = 96.676$
Moment total.....	.....	.....	.....	10.515.276

La hauteur qui sépare les ceintures du premier et du second étage étant de $h_1 = 53^m,2$, la poussée horizontale sera sur cette hauteur égale à :

$$H_1 = \frac{(V_e + p_e)a_1 + p'_1x'_1 + p'_2x'_2 + p'_3x'_3 + p'_4x'_4 + p'_5x'_5}{h_1} = \frac{10.515.276^{m.k}}{53^m,2} = 197.655^k.$$

Calcul de la poussée horizontale H_2 due aux charges verticales au-dessous de la ceinture ββ′ du premier étage.

DÉSIGNATION DES CHARGES VERTICALES.	POIDS TOTAUX CORRESPONDANT AUX 4 MONTANTS.	POIDS PAR MONTANT.	BRAS DE LEVIER PAR RAPPORT AU CENTRE DES APPUIS DU MONTANT.	MOMENTS.
	kilos.	kilos.		m. k.
Charges agissant dans la section XXIII au-dessus de la ceinture du 1er étage	3.933.690	$V_2 =$ 988.423		
Poids de la ceinture du 1er étage (panneau 5)	2.930.000	$p_2 =$ 739.750		
Total	6.912.690	$V_2 + p_2 = 1.728.173$	$a_2 = 24^m,078$	$(V_2 + p_2)a_2 = 41.610.050$
Poids du panneau 4	999.200	$p'_4 =$ 249.800	$x'_4 = 21^m,313$	$p'_4 x'_4 =$ 5.323.090
» 3	699.200	$p'_3 =$ 174.800	$x'_3 = 15^m,783$	$p'_3 x'_3 =$ 2.758.870
» 2	544.200	$p'_2 =$ 136.050	$x'_2 = 10^m,255$	$p'_2 x'_2 =$ 1.395.190
» 1	544.200	$p'_1 =$ 136.050	$x'_1 =$ 4m,725	$p'_1 x'_1 =$ 642.840
Moment total				51.731.840

La hauteur de la ceinture du premier étage au-dessus des appuis du montant étant $h_2 = 47^m,00$, la poussée horizontale au dessous de cette ceinture sera égale à :

$$H_2 = \frac{(V_2 + p_2)a_2 + p'_4 x'_4 + p'_3 x'_3 + p'_2 x'_2 + p'_1 x'_1}{h_2} = \frac{51.731.840^{m.k}}{47^m,0} = 1.080.000^k.$$

Ces valeurs qui sont sur chacun des montants, à la deuxième plate-forme : 197.655 k., à la première plate-forme 1.080.000 k., permettent d'établir les polygones des forces de la figure 6 de la planche XXXII, suivant la méthode donnée à la page 24 pour la figure 2.

On en déduit toutes les valeurs de N_2, effort de compression du montant et par suite $E_1 = \frac{N_2}{4}$, effort de compression de chacun des arbalétriers. On en tire également la valeur des efforts tranchants tels que D_2F de la même figure. Ces valeurs sont inscrites dans le tableau ci-dessous :

NUMÉROS DES SECTIONS.	EFFORTS DE COMPRESSION	
	DANS LE MONTANT N_2	DANS UN ARBALÉTRIER $E_1 = \frac{N_2}{4}$
	kilos.	kilos.
XVIII	736.000	184.000
XIX	796.000	199.000
XX	850.000	212.500
XXI	912 000	228.000
XXII	977.000	244.250
XXIII	1.045.000	261.250
XXIV	1.975.000	493.750
XXV	2.460.000	615.000
XVI	2.615.000	653.750
XXVII	2.770.000	692.500
XXVIII	2.895.000	723.750

NUMÉROS DES PANNEAUX.	EFFORTS TRANCHANTS		
	DANS LE MONTANT.	DANS UNE FACE.	COMPOSANTE MAXIMA DANS UNE BARRE DE TREILLIS.
11	63 000	31.500	»
10	53.000	26.500	»
9	35.000	17.500	13.300
8	7.500	3.750	3.000
7	32.500	16.250	12.100
6	88.000	44.000	33.400
5	0	0	0
4	82.500	41.250	34.000
3	14.000	7.000	5.900
2	57.500	28.750	24.900
1	116.000	58.000	48.500

Quant aux efforts dans les arbalétriers dus aux moments fléchissants, nous avons vu qu'ils étaient représentés par l'expression $E_2 = \frac{\mu_2}{i \sin \alpha_2}$ dans laquelle :

i est l'écartement normal des arbalétriers,

α_2, l'angle d'inclinaison sur l'horizontale de la projection de la fibre moyenne sur le plan vertical,

et μ_2, les ordonnées par rapport à B'C' (voir fig. 4) des polygones funiculaires construits avec les polygones des forces verticales comprises entre α et β et entre β et γ.

Ces polygones sont représentés dans les figures 4 et 8 de la planche XXXII. La distance polaire a été prise de 100.000 k. L'échelle des longueurs étant de 0m,003 par mètre, l'échelle des moments sera de 0m,003 par 100.000 m. k.

On arrive ainsi au tableau suivant :

NUMÉROS DES SECTIONS.	MOMENTS FLÉCHISSANTS μ_e.	INCLINAISONS $\sin \alpha_e$.	MOMENTS FLÉCHISSANTS RABATTUS DANS LA FACE $\frac{\mu_e}{\sin \alpha_e}$	ÉCARTEMENT NORMAL DES ARBALÉTRIERS l.	EFFORT CORRESPONDANT E_2.
				mètres.	
XVIII.....	+300.000	0,981	+305.000	10,30	+29.500
XIX.....	+ 41.000	0,981	+ 41.600	11,00	+ 3.800
XX.....	—100.000	0,980	—102.000	12,00	— 8.500
XXI.....	—140.000	0,976	—143.000	12,70	—11.300
XXII.....	— 40.000	0,970	— 41.000	13,40	— 3.100
XXIII.....	+300.000	0,958	+313.000	14,30	+21.800

NUMÉROS DES SECTIONS.	MOMENTS FLÉCHISSANTS μ_e.	INCLINAISONS $\sin \alpha_e$.	MOMENTS FLÉCHISSANTS RABATTUS DANS LA FACE $\frac{\mu_e}{\sin \alpha_e}$	ÉCARTEMENT NORMAL DES ARBALÉTRIERS l.	EFFORT CORRESPONDANT E_2.
				mètres.	
XXIV.....	+1.390.000	0,929	+1.500.000	14,10	+106.000
XV.....	— 240.000	0,893	— 268.000	13,67	— 19.800
XXVI.....	— 660.000	0,893	— 740.000	13,67	— 54.000
XXVII.....	— 258.000	0,893	— 290.000	13,67	— 21.200
XXVIII.....	+ 880.000	0,893	+ 980.000	13,67	+ 72.000

Les efforts totaux sur chacun des arbalétriers, ainsi que les coefficients de travail sont donnés par le tableau ci-dessous :

NUMÉROS DES SECTIONS.	COMPRESSION DANS UN ARBALÉTRIER E_1.	EFFORT DÛ AU MOMENT FLÉCHISSANT E_2.	EFFORTS TOTAUX DANS LES ARBALÉTRIERS			SECTIONS DES ARBALÉTRIERS			COEFFICIENTS DE TRAVAIL		
			a $E_a = E_1 + E_2$.	c $E_c = E_1 - E_2$.	b ou d. E_1.	a.	c.	b ou d.	a.	c.	b ou d.
			kilos.	kilos.	kilos.	m/mq.	m mq.	m/mq.			
XVIII.....	184.000	+ 29.500	213.500	154.500	184.000	43.136	56.308	55.664	4,95	2,74	3,30
XIX.....	199.000	+ 3.800	202.800	195.200	199.000	51.664	63.832	55.664	3,93	3,06	3,57
XX.....	212.500	— 8.500	204.000	221.000	212.500	51.664	59.616	55.622	3,96	3,70	3,82
XXI.....	228.000	— 11.300	216.700	239.300	228.000	51.584	59.424	59.736	4,20	4,03	3,81
XXII.....	244.250	— 3.100	241.150	247.350	244.250	51.424	67.544	67.908	4,71	3,66	3,59
XXIII.....	261.250	+ 21.800	283.050	239.450	261.250	51.024	66.928	67.376	5,54	3,58	3,88
XXIV.....	493.750	+106.000	599.750	387.750	493.750	82.824	77.892	77.892	7,24	4,90	6,34
XXV.....	615.000	— 19.800	595.200	634.800	615.000	79.992	84.792	84.792	7,44	7,48	7,25
XXVI.....	653.750	— 54.000	599.750	707.750	653.750	84.792	87.992	87.992	7,07	8,04	7,31
XXVII.....	692.500	— 21.200	671.300	713 700	692.500	87.992	87.992	91.192	7,64	8,11	7,55
XXVIII.....	723.750	+ 72.000	795.750	651.750	723.750	95.992	87.992	91.192	8,20	7,40	7,93

Quant aux barres de treillis, leurs coefficients de travail sont donnés par le tableau suivant :

NUMÉROS DES PANNEAUX.	COMPOSITION D'UNE BARRE.	SECTION.	EFFORT MAXIMUM SUIVANT UNE BARRE.	COEFFICIENT DE TRAVAIL.
		m/mq.	kilos.	
9.....	4 corn. de 80×80×9	5.436	13.300	2,46
8.....	Id.	5.436	3.000	0,55
7.....	Id.	5.436	12.100	2,22
6.....	Id.	5.436	33.400	6,14
5.....	Id.	»	»	»

NUMÉROS DES PANNEAUX.	COMPOSITION D'UNE BARRE.	SECTION.	EFFORT MAXIMUM SUIVANT UNE BARRE.	COEFFICIENT DE TRAVAIL.
		m.mq.	kilos.	
4.....	4 corn. de 100×100×12	9.024	34.000	3,78
3.....	4 corn. de 80× 80×10	6.000	5.900	0,98
2.....	Id.	6.000	24.900	4,15
1.....	4 corn. de 100×100×11	8.316	48.500	5,84

Tels sont les effets dus aux poids propres de la construction; nous allons maintenant étudier les effets dus au vent.

CHAPITRE III

EFFORTS DUS AU VENT

§ 1. — Principe de la construction.

Supposons, pour un instant, que nous ayons disposé dans les faces un treillis simple formant une paroi résistant aux efforts tranchants du vent, dont les composantes sont P', P'', P''', P'''' (fig. 8).

On sait que pour calculer les efforts agissant dans trois pièces coupées par un plan NM, il suffit de déterminer la résultante P de toutes les forces extérieures agissant au-dessus de la section et de décomposer cette résultante en trois forces passant par les trois barres coupées.

Si la forme du système est telle que, pour chaque coupe horizontale MN, les deux arbalétriers prolongés ont leur intersection sur la direction de la force extérieure P, l'effort dans la barre de treillis sera nul et l'on pourra supprimer cette barre.

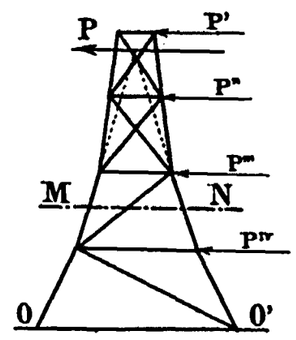


Fig. 8.

C'est l'application de ce principe qui constitue une des particularités du système employé pour la construction de la Tour, au moins dans sa moitié inférieure, et qui en détermine la forme extérieure. Elle permet, en supprimant tout treillis dans la plus grande partie de sa hauteur, de la constituer par quatre montants isolés, simplement reliés au niveau du 1er et du 2e étage par des ceintures horizontales.

On est conduit ainsi à infléchir la direction de chacun des éléments des montants suivant une courbe qui doit se confondre avec la courbe des pressions, si l'on se propose d'avoir des efforts tranchants nuls; mais cela n'est réalisable que pour une hypothèse unique.

Comme nous nous proposons d'examiner plusieurs hypothèses sur la répartition du vent, nous aurons à tracer une fibre moyenne se rapprochant de la moyenne des courbes de pression, de manière à réduire à leur minimum les moments fléchissants qui peuvent se produire suivant l'une ou l'autre hypothèse.

Remarquons que la courbe des pressions correspondant à un vent d'une intensité constante sur toute la hauteur de la Tour est indépendante de la valeur absolue de cette intensité et par suite que cette intensité n'a pas d'influence sur la forme même de la Tour.

Comme les courbes de pression ne passent pas exactement au centre des montants, c'est-à-dire ne se confondent pas complètement avec la fibre moyenne, il en résulte des moments fléchissants et des efforts tranchants qu'il y a lieu de calculer.

§ 2. — Intensité du vent.

Nous avons admis plusieurs hypothèses :

a. — La première donne lieu, en général, aux fatigues maxima : c'est celle d'un vent de 300 k. par mètre carré agissant uniformément sur toute la hauteur de la Tour.

D'après la formule généralement admise, $P=0,12V^2$, dans laquelle P est la pression par mètre carré et V la vitesse, cette pression de 300 kilos correspond à une vitesse de 50 mètres par seconde, qui est celle d'un grand ouragan.

Quelle que soit l'incertitude qui règne sur la mesure même de pareilles vitesses, on peut être assuré qu'il n'en a jamais été observé de semblables dans nos régions, au moins aux environs du sol; si elles se

réalisaient, elles donneraient lieu à de véritables désastres. Une pression de 150 k. renverse les trains de chemin de fer, ainsi que cela a été observé à Rivesaltes, et celle de 270 k. est le maximum admis par la circulaire ministérielle dn 29 août 1891, pour le calcul des ouvrages d'art. Ce dernier chiffre est celui qui est généralement adopté dans ces calculs.

Nous devons dire cependant que des rafales de 40 mètres de vitesse ont déjà été indiquées par les instruments placés au sommet de la Tour, toutes réserves faites sur la justesse de ces indications.

Elles correspondent, d'après la formule, à des pressions de 200 k. par mètre carré. Mais, ainsi qu'il sera dit plus loin, nous avons des raisons de penser, d'après des expériences directes de pression, que la formule ci-dessus donne des résultats trop élevés et que le coefficient de 0,12 devrait se réduire à 0,09, ce qui donnerait en réalité pour des vents de 50 mètres, 225 kilos de pression par mètre carré et pour des vents de 40 mètres, 150 k. de pression. Notre hypothèse de 300 k. correspondrait à un vent de 60 mètres par seconde ou 216 kilomètres à l'heure, lequel n'a jamais été observé. En admettant qu'il se produise à un certain moment au sommet, il diminuerait rapidement en se rapprochant du sol.

b. — Cette considération nous a conduit à examiner une seconde hypothèse qui est également excessive quoique plus voisine de la réalité : c'est celle d'un vent atteignant 400 k. au sommet et diminuant progressivement pour se réduire à 200 kilos à la surface du sol.

En un point quelconque, situé à une hauteur h au-dessus du sol, l'intensité du vent sera de 200 k. $+ \frac{200}{300} \times h$.

Avec le coefficient de 0,12 les vitesses respectives correspondantes sont de 58 mètres au sommet et 40 mètres à la base; avec le coefficient de 0,09, les vitesses seraient de 66 mètres et de 47 mètres.

Ces deux hypothèses conduisent aux extrêmes limites des coefficients de travail et ce sont elles qui nous ont servi à déterminer les sections des divers éléments de la Tour.

Néanmoins, une fois les sections déterminées il nous a paru utile, pour rentrer dans les probabilités maxima de la pratique, de rechercher ce que deviennent les coefficients extrêmes dans le cas d'un vent variant de 300 kilos au sommet à 100 kilos à la surface du sol.

§ 3. — Surfaces offertes au vent.

Les surfaces présentées au vent sont déterminées en supposant que le vent agisse normalement aux faces, dans une direction horizontale; ce qui revient à les évaluer en les comptant dans leur projection verticale.

Les surfaces pleines (planchers, galeries, restaurants, etc.) ont été naturellement comptées dans leur totalité. Pour la détermination des surfaces évidées, nous avons admis que la première paroi normale au vent est entièrement frappée par celui-ci avec sa pleine intensité et que les parois voisines qu'elle protège partiellement sont aussi frappées entièrement, mais par un vent dont l'intensité est diminuée dans le rapport des vides aux pleins de la paroi antérieure. Cela revient à dire que pour une même intensité du vent, si s_1 et s_2 représentent les surfaces des pièces rencontrées par le vent sur la première et la deuxième face, S_1 la surface de la première face supposée entièrement pleine, nous aurons à compter pour la seconde face une surface de $s_2 \times \frac{S_1 - s_1}{S_1}$.

Nous avons appliqué la même méthode pour déterminer les surfaces offertes au vent par les barres de treillis et les entretoises qui sont en forme de caisson et dont les 4 cornières d'angle sont réunies entre elles par un petit treillis.

Cette hypothèse n'est plus exacte quand la distance entre la première surface frappée et celle qui est derrière devient grande; car, par suite de cette distance, le vent reprend son intensité première. Aussi dans la partie intermédiaire entre la première et la deuxième plate-forme, nous avons admis que le vent frappait également tous les montants. A la base de la Tour, en raison du grand nombre et de l'importance des pièces de liaison qui réunissent les arbalétriers, nous avons été encore plus loin : nous avons admis que les quatre montants étaient pleins ou plus exactement qu'ils étaient remplacés par leur projection pleine sur le plan vertical et qu'en outre ils étaient tous également frappés. Ce mode de calcul conduit à peu près aux mêmes résultats que l'application des règles précédentes, ainsi que nous avons pu nous en rendre compte, mais il est plus simple.

§ 4. — Division en éléments.

Dans la suite des calculs, nous admettrons que l'action du vent se trouve concentrée en un certain nombre de points convenablement répartis sur toute la hauteur de la Tour. Nous avons, à cet effet, divisé la Tour par des plans horizontaux en 28 éléments ou surfaces frappées. A chacune d'elles correspond un effort du vent que nous appliquerons au centre de l'élément.

Cette division de la Tour en éléments est indiquée dans la planche N° XXXIII.

Chaque élément courant comprend deux demi-panneaux adjacents et comme les hauteurs de deux panneaux successifs ne diffèrent jamais beaucoup l'une de l'autre, le centre d'action du vent sur un élément peut être considéré comme situé sur l'entretoise horizontale qui sépare les deux panneaux; ainsi sur chacune de ces entretoises se trouve concentrée la moitié des efforts qui agissent sur les deux panneaux adjacents.

§ 5. — Surfaces des éléments, efforts du vent par élément et moments de renversement correspondants.

Nous avons reporté dans un appendice le calcul détaillé des surfaces de chacun des panneaux et nous donnons dans le tableau ci-dessous les surfaces correspondant à chacun des éléments 0 à 28, ainsi que les efforts P dus au vent dans les deux hypothèses, obtenus en multipliant les surfaces par 300 k. et $\left(200+\frac{200}{300}h\right)$ kilos.

Nous inscrirons dans le même tableau les hauteurs h du centre des éléments au dessus de la base ainsi que le moment de renversement Ph correspondant.

NUMÉROS DES ÉLÉMENTS.	DÉTERMINATION DES SURFACES DES ÉLÉMENTS.	SURFACES DES ÉLÉMENTS.	HAUTEUR DES ÉLÉMENTS AU-DESSUS DE LA BASE h.	VENT DE 300 : EFFORT P DU VENT SUR L'ÉLÉMENT.	VENT DE 300 : MOMENT DE RENVERSEMENT Ph.	VENT DE 400 EN HAUT ET DE 200 EN BAS : EFFORT DU VENT PAR m² $200+\frac{200}{300}h$.	VENT DE 400 EN HAUT ET DE 200 EN BAS : EFFORT P DU VENT SUR L'ÉLÉMENT.	VENT DE 400 EN HAUT ET DE 200 EN BAS : MOMENT DE RENVERSEMENT Ph.
		m².	mètres.	kilos.	m. k.	kilos.	kilos.	m. k.
0.....	Panneau 29 et campanile	315,5	275,40	94.650	26.066.610	384	121.150	33.364.710
1.....	» 28 + 1/2 panneau 27 = $55,42+\frac{58^{m2},58}{2}$	84,71	256,57	25.410	6.519.444	371	31.430	8.063.995
2.....	1/2 » 27 + 1/2 » 26 = $\frac{58,58+61,91}{2}$	60,24	250,40	18.070	4.524.728	367	22.110	5.536.344
3.....	1/2 » 26 + 1/2 » 25 = $\frac{61,91+65,44}{2}$	63,68	243,88	19.100	4.658.108	362	23.050	5.621.434
4.....	1/2 » 25 + 1/2 » 24 = $\frac{65,44+69,16}{2}$	67,30	237,00	20.190	4.785.030	358	24.090	5.709.330
5.....	1/2 » 24 + 1/2 » 23 = $\frac{69,16+73,10}{2}$	71,13	229,71	21.340	4.902.011	353	25.110	5.768.018
6.....	1/2 » 23 + 1/2 » 22 = $\frac{73,10+77,26}{2}$	75,18	222,02	22.550	5.006.551	348	26.160	5.808.043
7.....	1/2 » 22 + 1/2 » 21 = $\frac{77,26+81,67}{2}$	79,46	213,80	23.840	5.099.138	343	27.250	5.828.502
8.....	1/2 » 21 + 1/2 » 20 = $\frac{81,67+86,32}{2}$	84,00	205,20	25.200	5.173.308	337	28.300	5.809.707
9.....	1/2 » 20 + 1/2 » 19 = $\frac{86,32+120}{2}$	103,16	196,20	30.950	6.072.390	331	34.150	6.700.230
10.....	1/2 » 19 + 1/2 » 18 = $\frac{120+119,6}{2}$	119,80	186,60	35.940	6.706.404	325	38.930	7.264.338
11.....	1/2 » 18 + 1/2 » 17 = $\frac{119,6+125,1}{2}$	122,35	176,60	36.700	6.481.220	318	38.900	6.869.740
12.....	1/2 » 17 + 1/2 » 16 = $\frac{125,1+137.34}{2}$	131,22	166,60	39.370	6.559.042	311	40.810	6.798.946
13.....	1/2 » 16 + 1/2 » 15 = $\frac{137,34+143,43}{2}$	140,38	156,10	42.110	6.573.371	304	42.680	6.662.348
14.....	1/2 » 15 + 1/2 » 14 = $\frac{143,43+151,16}{2}$	147,30	145,60	44.190	6.434.064	297	43.750	6.370.000
15.....	1/2 » 14 + 1/2 » 13 = $\frac{151,16+158,9}{2}$	155,03	135,00	46.500	6.277.500	290	44.960	6.069.600
16.....	1/2 » 13 + 1/2 » 12 = $\frac{158,9+310}{2}$	234,45	124,30	70.330	8.742.019	283	66.350	8.247.305
17.....	1/2 » 12 + 1/2 » 11 = $\frac{310+177}{2}$	243,50	113,00	73.050	8.254 650	275	66.960	7.566.480
	A reporter.....	2.298,39		689.490	128.835.588		746.140	144.059.070

NUMÉROS DES ÉLÉMENTS.	DÉTERMINATION DES SURFACES DES ÉLÉMENTS.	SURFACES DES ÉLÉMENTS.	HAUTEUR DES ÉLÉMENTS AU-DESSUS DE LA BASE A	VENT DE 200k PAR m². EFFORT P DU VENT SUR L'ÉLÉMENT.	VENT DE 200k PAR m². MOMENT DE RENVERSEMENT PA.	VENT DE 270k EN HAUT ET 200k EN BAS. EFFORT DU VENT PAR m² $200 + \frac{200}{300}$ A.	VENT DE 270k EN HAUT ET 200k EN BAS. EFFORT P DU VENT SUR L'ÉLÉMENT.	VENT DE 270k EN HAUT ET 200k EN BAS. MOMENT DE RENVERSEMENT PA.
		m².	mètres.	kilos.	m. k.	kilos.	kilos.	m. k.
	Report.....	2.298,30		689.490	123.835.588		740.140	141.039.070
18.....	$1/2 \quad » \quad 11+1/2 \quad » \quad 10 = \frac{177+355}{2}$	266,10	108,10	79.830	8.629.023	272	72.380	7.821.278
19.....	$1/2 \quad » \quad 10+1/2 \quad » \quad 9 = \frac{355+340}{2}$	347,60	98,10	104.280	10.229.868	265	92.110	9.035.091
20.....	$1/2 \quad » \quad 9+1/2 \quad » \quad 8 = \frac{340+307,2}{2}$	353,60	87,90	106.080	9.324.432	258	91.230	8.019.117
21.....	$1/2 \quad » \quad 8+1/2 \quad » \quad 7 = \frac{307,2+307,2}{2}$	367,20	76,90	110.160	8.471.304	251	92.170	7.087.873
22.....	$1/2 \quad » \quad 7+1/2 \quad » \quad 6 = \frac{307,2+656,1}{2}$	511,65	65,90	153.500	10.115.650	244	124.840	8.226.956
23.....	$1/2 \quad » \quad 6+1/2 \quad » \quad 5 = \frac{656,1+493,1}{2}$	574,80	54,90	172.440	9.466.956	237	136.230	7.479.027
24.....	$1/2 \quad » \quad 5+1/2 \quad » \quad 4 = \frac{493,1+823,9}{2}$	658,70	47,90	197.610	9.465.519	232	152.820	7.320.078
25.....	$1/2 \quad » \quad 4+1/2 \quad » \quad 3 = \frac{823,9+1.137,8}{2}$	980,85	30,90	294.220	10.856.718	225	220.690	8.143.401
26.....	$1/2 \quad » \quad 3+1/2 \quad » \quad 2 = \frac{1.137,8+780}{2}$	958,90	25,90	287.670	7 450.653	217	208.080	5.389.272
27.....	$1/2 \quad » \quad 2+1/2 \quad » \quad 1 = \frac{780+807,4}{2}$	793,70	14,90	238.110	3.547.839	210	166.680	2.483.532
28.....	$1/2 \quad » \quad 1 \quad » \quad \frac{807,4}{2}$	403,70	3,90	121.110	472 320	203	81.950	319.605
	Total.....	8.515,19		2.554.500	216.866.479		2.185.320	215.388.260

Il résulte de ce tableau que l'ensemble de la Tour présente au vent une surface de $8515^{m2},19$, que le vent, dans les deux hypothèses, y exerce des efforts qui sont respectivement de 2554 tonnes et 2185 tonnes, enfin que les moments de renversement totaux sont respectivement de 216.866 tonnes-mètres et 215.388 tonnes-mètres; c'est-à-dire qu'au point de vue de cet effet, les deux hypothèses sont à peu près équivalentes.

Dans la première hypothèse, le centre d'action du vent est situé à une hauteur de $\frac{216.866^{t.m}}{2.554^{t}} = 84^{m},9$ au-dessus des appuis; dans la deuxième $\frac{215.388^{t.m}}{2.185^{t}} = 98^{m},55$.

Nous allons maintenant, étant connus les efforts, en examiner l'effet sur chacune des parties de la Tour. Mais il faut pour cela considérer successivement, soit la partie supérieure, c'est-à-dire celle située au-dessus du 2e étage, dans laquelle tous les montants sont solidairement réunis; soit la partie inférieure, c'est-à-dire celle allant du 2e étage au sol, dans laquelle les quatre montants sont distincts et ne sont plus réunis que par les ceintures du 1er et du 2e étage.

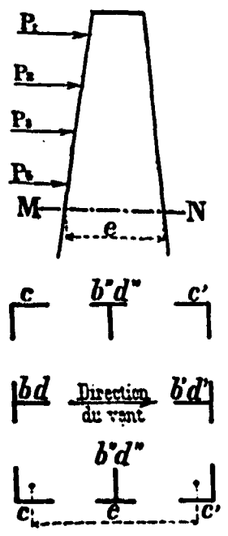


Fig. 9.

§ 6. — Calcul des efforts moléculaires dus au vent dans la partie supérieure.

a. *Arbalétriers.* — Les arbalétriers de chacune des faces étant rendus solidaires par leurs treillis, le calcul des efforts se fait simplement à l'aide des moments fléchissants.

Soit M le moment fléchissant de tous les efforts du vent agissant au-dessus de la section MN, ω la section des 3 arbalétriers de la face *cc* frappée par le vent ou celle de la face opposée *c'c'*; *e* l'écartement horizontal des centres des faces opposées, et E l'effort dans une face; la valeur de ce dernier sera $\frac{M}{e}$ et le coefficient de travail $R_1 = \frac{E}{\omega}$, en admettant que les arbalétriers soient sensiblement verticaux et que les arbalétriers *b"d"*, voisins de la fibre neutre, aient un moment de résistance négligeable.

En faisant le calcul pour la région voisine du 2e étage, dans laquelle les arbalétriers *bd* sont séparés et en y introduisant le moment d'inertie exact, tenant compte de ces arbalétriers, il serait facile de reconnaître

que, même en ces points, leur influence est négligeable et n'affecte le coefficient de travail que de $0^k,2$ environ (1).

La courbe des moments fléchissants est tracée dans la planche XXXIII, figure 3, pour chacune de ces deux hypothèses, à l'aide des polygones des forces, figures 1 et 2.

L'échelle des longueurs étant de $0^m,002$ par mètre et les distances polaires étant de 800.000 kilos, il en résulte pour les moments une échelle de $\frac{0,002}{800.000}$ soit 0,0025 pour 1.000.000 kgm. Ils peuvent être directement lus sur l'épure.

Pour les calculer numériquement, on se sert de la considération suivante :

Soient deux sections S_n et S_{n+1}, séparées par la hauteur h_n du panneau, dans lesquelles M_n et M_{n+1} sont les moments fléchissants, T_n et T_{n+1} sont les efforts tranchants et soit P_n l'effort du vent dans la section S_n.

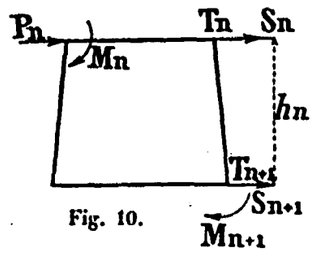


Fig. 10.

On a $M_{n+1} = M_n + (T_n + P_n)\, h_n$ ou $M_{n+1} = M_n + T_{n+1} h_n$, ce qui permet de déduire chaque moment du moment précédent, en y ajoutant le produit de l'effort tranchant au point considéré par la hauteur du panneau.

C'est ainsi que l'on a établi les chiffres inscrits dans le tableau qui va suivre de la section I jusqu'à la section XVII. Comme vérification, nous avons aussi déterminé directement pour cette section XVII, le moment fléchissant correspondant à chacune des deux hypothèses; il est la somme de tous les moments partiels dus aux efforts du vent agissant au-dessus de cette section; nous donnerons d'abord ce tableau.

Calcul du moment fléchissant dans la section XVII.

NUMÉROS DES EFFORTS DU VENT.	ORDONNÉE y DE L'EFFORT DU VENT AU-DESSUS DE LA SECTION XVII.	VENT DE 300 K PAR MÈTRE CARRÉ		VENT DE 400 A 200 K PAR MÈTRE CARRÉ	
		EFFORT DU VENT P.	MOMENTS Py.	EFFORT DU VENT P.	MOMENTS Py.
	mètres.	kilos.		kilos.	
0.....	162,4	94.650	15.371.160	121.150	19.674.760
1.....	143,57	25.410	3.648.114	31.430	4.512.405
2.....	137,40	18.070	2.482.818	22.110	3.037.914
3.....	130,88	19.100	2.499.808	23.050	3.016.784
4.....	124,00	20.190	2.503.560	24.090	2.987.160
5.....	116,71	21.340	2.490.591	25.110	2.930.588
6.....	109,02	22.550	2.458.401	26.160	2.851.963
7.....	100,80	23.840	2 405.218	27.250	2.749.252
8.....	92,20	25.200	2.325.708	28.300	2.611.807
A reporter....		270.350	36.185.378	328.650	44.372.633

NUMÉROS DES EFFORTS DU VENT.	ORDONNÉE y DE L'EFFORT DU VENT AU-DESSUS DE LA SECTION XVII.	VENT DE 300 K PAR MÈTRE CARRÉ		VENT DE 400 A 200 K PAR MÈTRE CARRÉ	
		EFFORT DU VENT P.	MOMENTS Py.	EFFORT DU VENT P.	MOMENTS Py
	mètres.	kilos.		kilos.	
Report.....		270.350	36.185.378	328.650	44.372.633
9.....	83,20	30.950	2.575.040	34.150	2.841.280
10.....	73,60	35.940	2.645.184	38.930	2.865.248
11.....	63,60	36.700	2.334.120	38.900	2.474.040
12.....	53,60	39.730	2.110.232	40.810	2.187.416
13.....	43,10	42.110	1.814 941	42.080	1.839.508
14.....	32,60	44.190	1.440.594	43.750	1.426.250
15.....	22,00	46.500	1.023.000	44.960	989.120
16..... ...	11,30	70.330	794.729	66.350	749.755
Totaux. ...		616.440	50.923.218	679.180	59.745.250

Les moments dans cette section sont ainsi de 50.923.218 m. kg. dans la 1re hypothèse et de 59.745.250 m. kg. dans la deuxième.

Dans le tableau ci-dessous nous avons résumé les éléments du calcul pour chacune des sections, comme moments fléchissants et comme efforts tranchants, ainsi que les efforts dans les faces et les coefficients de travail dans les arbalétriers.

(1) Nous avons admis dans ce qui précède que les arbalétriers bd, $b'd'$, sont assimilés aux arbalétriers c et c'. En effet, ils sont rendus solidaires de ces derniers par des treillis et des ceintures horizontales qui assurent une complète liaison. Ils subissent donc les mêmes déformations longitudinales et par suite travaillent au même coefficient.

Calcul du moment fléchissant, de l'effort tranchant et du coefficient de travail dans les arbalétriers pour chacune des sections au-dessus de la section XVII.

NUMÉROS DES SECTIONS.	HAUTEURS AU DESSUS DE LA SECTION XVII.	HAUTEURS PARTIELLES h_n.	ÉCARTEMENT DES FACES e.	SURFACE DES ARBALÉTRIERS D'UNE FACE ω.	VENT DE 3ᵏ/ᵐ² PREMIÈRE HYPOTHÈSE. MOMENT M DU AU VENT.	EFFORT DANS UNE FACE $E=\frac{M}{e}$.	EFFORT TRANCHANT.	COEFFICIENT DE TRAVAIL $R=\frac{E}{\omega}$.	VENT DE 150ᵏ EN HAUT ET 200ᵏ EN BAS. DEUXIÈME HYPOTHÈSE. MOMENT M DU AU VENT.	EFFORT DANS UNE FACE $E=\frac{M}{e}$.	EFFORT TRANCHANT.	COEFFICIENT DE TRAVAIL $R=\frac{E}{\omega}$.
	m.	m.	m.	m m².	m. k.	k.	k.	k.	m. k.	k.	k.	k.
I	143,57	6,17	10,57	83.936	1.782.638	169.000	94.650	2,0	2.281.739	216.000	121.150	2,6
II	137,40	6,52	11,17	97.936	2.522.928	226.000	120.060	2,3	3.222.547	288.500	152.580	2,9
III	130,88	6,88	11,81	97.936	3.423.121	290.000	138 130	3,0	4.361.002	369.000	174.690	3,8
IV	124,00	7,29	12,48	97.936	4.506.121	361.000	157.230	3,7	5.723.035	459.000	197.740	4,7
V	116,71	7,69	13,19	97.936	5.797.739	440.000	177.420	4,5	7.337.958	556.000	221.830	5,7
VI	109,02	8,13	13,94	97.936	7.327.197	526.000	198.760	5,4	9.238.161	663.000	246.940	6,8
VII	100,89	8,60	14,74	97.936	9.127.111	619.000	221.310	6,3	11.459.283	777.000	273.100	8,0
VIII	92,29	9,09	15,58	129.936	11.234.666	721.000	245.150	5,6	14.041.392	901.000	300.350	6,9
IX	83,20	9,60	16,46	129.936	13.691.066	832.000	270.350	6,4	17.027.506	1.034.000	328.650	7,9
X	73,60	10,00	17,40	135.936	16.584.751	953.000	301.300	7,0	20.511.837	1.179.000	362.800	8,7
XI	63,60	10,00	18,50	168.150	19.957.151	1.079.000	337.240	6,4	24.529.137	1.326.000	401.730	7,9
XII	53,60	10,50	20,01	183.228	23.696.551	1.184.000	373.940	6,5	28.935.437	1.446.000	440.630	7,9
XIII	43,10	10,50	21,60	183.228	28.036.306	1.298.000	413.310	7,1	33.990.557	1 574.000	481.440	8,6
XIV	32,60	10,60	23,60	203.228	32.818.216	1 390.000	455.420	6,8	39.493.817	1.673.000	524.120	8,2
XV	22,00	10,70	25,80	213 228	38.114.082	1.477.000	499.610	6,9	45.513.239	1.764.000	567.870	8,3
XVI	11,30	11,30	28,67	213.228	43.957.459	1.533.000	546.110	7,2	52.070.520	1.816.000	612.830	8,5
XVII	0	0	31,70	213.228	50.923.218	1.606.500	616.440	7,4	59.745.250	1.885.000	679.180	8,8

Le travail maximum dû au vent dans les arbalétriers a lieu dans la section XVII où il atteint $7^k,4$ et $8^k,8$ par millimètre carré.

b. *Treillis.* — Nous admettrons que les efforts des treillis coupés par une même section horizontale MN se répartissent également entre toutes les barres des parois résistantes. On calculera donc l'effort F suivant ces barres comme si l'une d'elles, A′D par exemple, était seule, et comme le nombre des barres résistantes est de 8, soit 4 par paroi, on admettra que l'effort pour chacune des barres est de $\frac{F}{8}$.

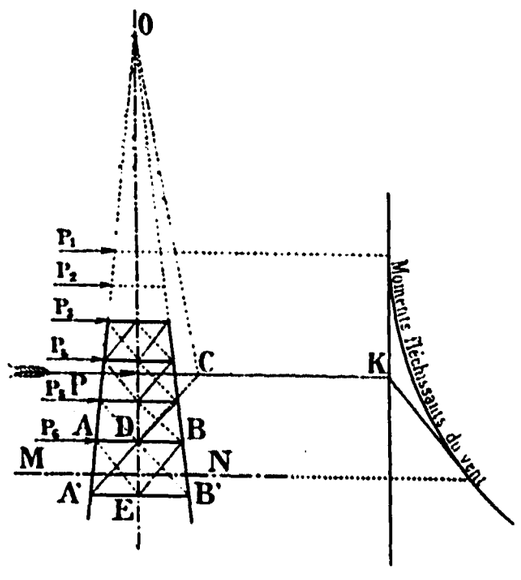


Fig. 11.

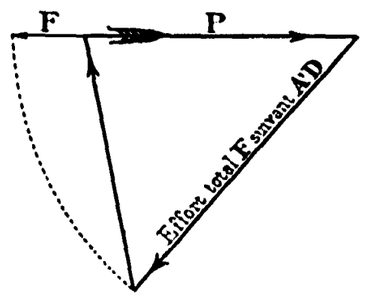


Fig. 12.

L'effort F s'obtient en décomposant la force extérieure en 3 forces passant par les arbalétriers A′A, BB′ et par les barres A′D.

Il suffit pour cela (fig. 11) de prolonger les directions AA′, BB′ jusqu'à leur point de rencontre O, et la direction A′D jusqu'au point de rencontre C avec celle de la résultante des forces extérieures P, puis de joindre CO et de construire le polygone des forces de la figure 12; sa ligne de fermeture parallèle à A′D donne l'effort F cherché. La position de la force extérieure P elle-même est obtenue pour chaque section MN, au moyen du polygone funiculaire des moments fléchissants dus au vent (fig. 11), en déterminant l'intersection K de son premier élément vertical avec la prolongement de l'élément coupé.

On aurait pu prendre la barre DB' et on aurait obtenu le même effort d'une façon semblable, en raison de la symétrie des barres A'D et DB'.

Quant aux barres AE ou EB, on obtiendrait des efforts légèrement supérieurs, mais assez peu différents pour qu'il y ait lieu d'en tenir compte; c'est pour ce motif que nous avons considéré seulement la barre A'D et que nous avons donné aux autres la même section. Pour la clarté de la figure d'ensemble, planche XXXIII, nous avons rabattu la force F sur la direction de la force P. (fig. 12).

Le tableau ci-dessous donne pour chaque section, dans les deux hypothèses, la valeur de l'effort F, celle $\frac{F}{8}$ de l'effort dans chaque barre, la section de celle-ci et le travail correspondant.

Calcul des efforts et des coefficients de travail dans les barres de treillis au-dessus de la section XVII.

N°s des panneaux.	N°s des sections correspondantes.	Composition d'une barre.	Surface de la section d'une barre.	Vent de 300 kilos.			Vent de 400 à 200 kilos.		
				Effort total suivant les barres.	Effort par barre.	Coefficient de travail.	Effort total suivant les barres.	Effort par barre.	Coefficient de travail.
			m/m².	k.	k.	k.	k.	k.	k.
28	I	4 corn. 80×80×8	4.864	121.150	15.144	3,1	156.500	19 563	4
27	II	4 » 80×80×8	4 864	137.500	17.188	3,5	177 000	22.125	4,55
26	III	4 » »	4.864	160.000	20.000	4,1	204.000	25.500	5,25
25	IV	4 » »	4.864	181.250	22.656	4,7	227.500	28.438	5,85
24	V	4 » 90×90×9	6.156	199.000	24.875	4,3	250.000	31.250	5,10
23	VI	4 » »	6 156	218.000	27.250	4,4	272.500	34.063	5,50
22	VII	4 » 90×90×11	7.436	240.000	30.000	4,0	295.500	36.875	4,95
21	VIII	4 » 90×90×12	8.064	261.250	32.656	4,0	317.500	39.688	4,90
20	IX	4 » 90×90×11	7.436	282.000	35.250	4,7	343.750	42.969	5,75

N°s des panneaux.	N°s des sections correspondantes.	Composition d'une barre.	Surface de la section d'une barre.	Vent de 300 kilos.			Vent de 400 à 200 kilos.		
				Effort total suivant les barres.	Effort par barre.	Coefficient de travail.	Effort total suivant les barres.	Effort par barre.	Coefficient de travail.
			m/m².	k.	k.	k.	k.	k.	k.
19	X	4 corn. 90×90×11	7.436	306.500	38.313	5,1	370.000	46.250	6,2
18	XI	4 » »	7.436	323 000	40.375	5,4	380.000	47.500	6,4
17	XII	4 » 90×90×13	8.684	291.650	36 456	4,2	330.000	41.250	4,75
16	XIII	4 » »	8.684	330.000	41.250	4,75	370.000	46.250	5,3
15	XIV	4 » 90×90×11	7.436	288.000	36.000	4,85	311.250	38.906	5,2
14	XV	4 » »	7.436	295.000	36.875	4,95	306.000	38.250	5,15
13	XVI	4 » 90×90×12	8.064	202.000	25.313	3,15	194.500	24.313	3,00
12	XVII	4 » »	8.064	285.000	35.625	4,4	268.000	33.500	4,15

Le coefficient de travail moyen est aux environs de 5 à 6 kilos.

§ 7. — Calcul des efforts moléculaires dus au vent dans la partie inférieure.

a) Principes des calculs.

Soient P_1, P_2, P_3... P_n les différentes composantes du vent agissant sur la Tour à des hauteurs h_1, h_2, h_3... h_n au-dessus de la base AA'.

Supposons tracé le polygone funiculaire de ces forces, pour la partie inférieure seulement (fig. 13), à l'aide du polygone des forces (fig. 14) dans lequel les efforts sont portés horizontalement et dont la distance polaire est V'.

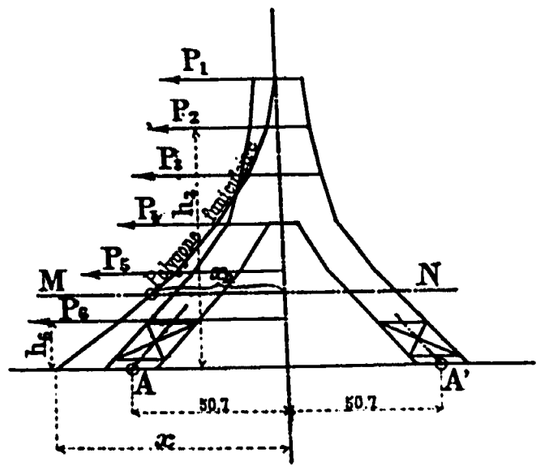


Fig. 13.

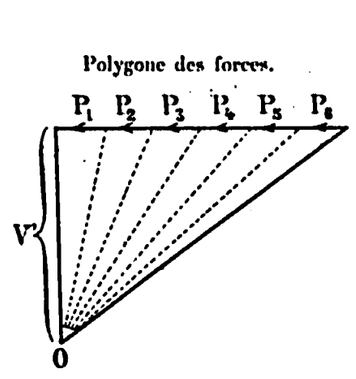


Fig. 14.

Soit $M = \Sigma P_n h_n$ le moment de renversement total de tous les efforts du vent P_1, P_2,... P_n, par rapport à la base AA' de la Tour.

Le moment dans une section quelconque MN est $M_n = x_n V'$, à la base il est $M = xV'$, expressions dans lesquelles x_n et x représentent les abscisses du polygone funiculaire dans la section MN et à la base (fig. 13).

Quant à la distance polaire V', elle est arbitraire : pour avoir celle correspondant au polygone funiculaire passant par les appuis, il suffit de poser M = 50,7 V, 50,7 étant l'abscisse du centre des montants à la base; d'ou l'on tire $V = \frac{M}{50,7}$.

Ce polygone funiculaire est alors en même temps la courbe des pressions des efforts du vent.

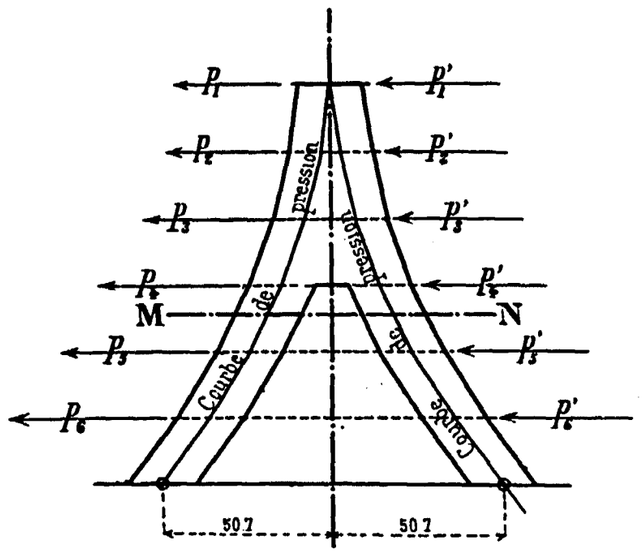


Fig. 15.

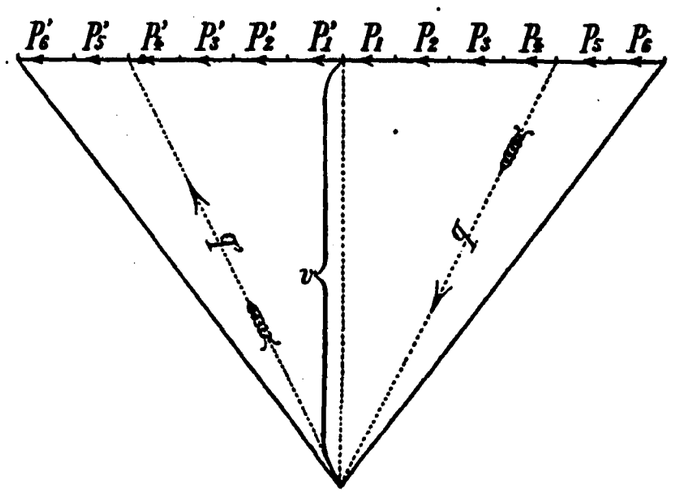


Fig. 16.

Comme nous ne déterminons les efforts que pour un seul montant, il est plus simple de porter dans le polygone des forces, au lieu des efforts totaux P, le quart de ces efforts pour obtenir directement l'effort dans un montant.

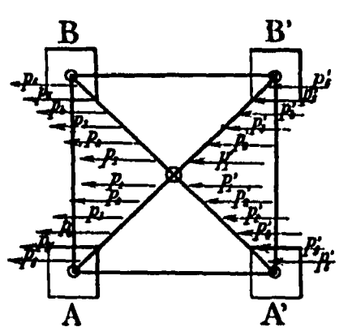


Fig. 17.

La courbe des pressions correspondant à ces efforts $p_1 = \frac{P_1}{4}$, $p_2 = \frac{P_2}{4}$... etc., est à tracer avec une distance polaire $v = \frac{V}{4}$ (fig. 15 et 16).

Pour une section MN (fig. 15) la force extérieure q sur un montant est donnée dans le polygone des forces (fig. 16).

Les efforts dans les montants sont des efforts de tension q' dans les deux premiers montants A' et B' frappés par le vent, et des efforts symétriques de compression q dans les deux autres montants A et B (fig. 17).

Nous ne considérons que les montants où le vent produit des efforts de compression qui viennent s'ajouter à ceux qui sont produits par le poids propre de la construction.

La force extérieure q produit dans la section MN :

1° Un effort de compression N agissant dans la fibre moyenne du montant.

2° Un effort tranchant T normal à cette fibre moyenne.

3° Des moments fléchissants provenant de ce que la courbe des pressions ne passe pas dans cette section au même point que la fibre moyenne, c'est-à-dire par l'axe du montant.

b) Efforts de compression et efforts tranchants.

Ces efforts s'obtiennent pour chaque section en décomposant dans le polygone des forces (fig. 18) la force extérieure q en deux forces, l'une OC parallèle à la direction de la fibre moyenne dans la section MN, l'autre CD normale à cette même direction.

Cet effort CD est l'effort tranchant T que l'on décomposera suivant les directions des barres de treillis du panneau coupé par la section MN ; on aura ainsi l'effort produit par le vent dans ces barres.

Quant à l'effort de compression OC, comme le montant est incliné suivant le plan diagonal de la Tour, cet effort qui agit dans un plan vertical est encore à décomposer suivant la direction du montant dans la face perpendiculaire à la figure (fig. 18).

Cette décomposition peut se faire très simplement de la manière suivante :

Du pôle O du polygone des forces comme centre, on trace un arc de cercle quelconque allant du point I

situé sur la verticale du pôle jusqu'au point de rencontre K avec OC. Du point K, on élève une perpendiculaire KL à OC et du point I, une perpendiculaire IL à KL; on obtient ainsi le point L, intersection de ces deux lignes.

En décomposant la composante OC suivant la direction de OL, on obtient l'effort de compression N = OE dans le montant. L'angle CEO est en effet égal à l'inclinaison en rabattement de la fibre moyenne dans l'une des faces du montant.

En effet, MN étant un plan horizontal (fig. 20), pour avoir OL, connaissant OK, il suffit d'avoir la

Fig. 18.

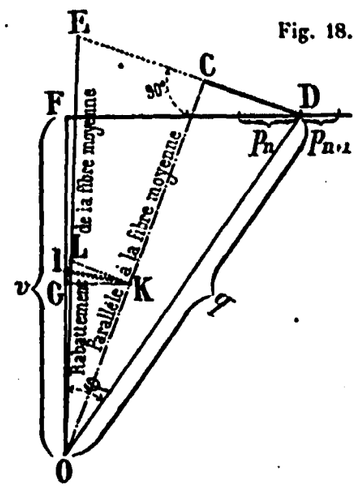
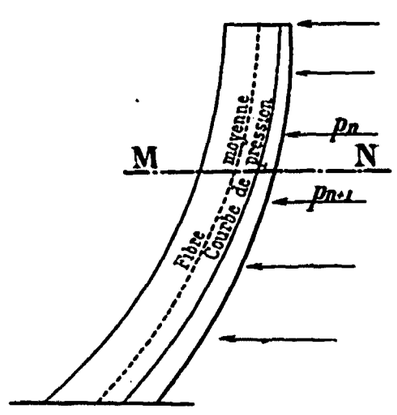


Fig. 19.



longueur KL = KG et de la porter sur une perpendiculaire à OK élevée au point K. Or, comme nous l'avons démontré p. 24, à propos des charges verticales, G est sur l'horizontale menée par K, et KG ramenée en KL donne le point L cherché (fig. 18). On voit de suite que la construction indiquée ci-dessus, au moyen des perpendiculaires KL et IL, se ramène à celle-ci; elle définit graphiquement le point L très exactement.

Cet effort N qui agit au centre O du montant dans la section MN, se répartit également entre les quatre arbalétriers *a*, *b*, *c* et *d* (fig. 21) et donne dans chacun d'eux un effort de compression $E_1 = \frac{N}{4}$.

Les courbes de pression qui correspondent aux deux cas de surcharge du vent ont été tracées dans l'épure de la Planche XXXII, fig. 3, à l'aide des polygones des forces fig. 1 et fig. 2, qui n'ont été déterminés

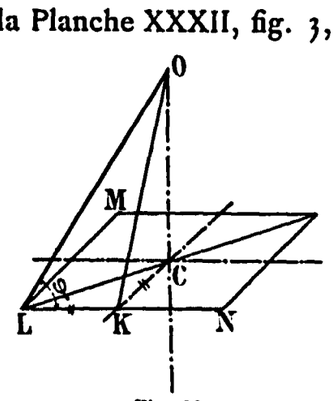


Fig. 20.

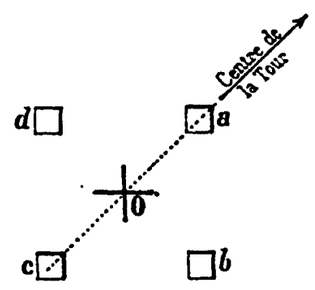


Fig. 21. — Plan d'un montant.

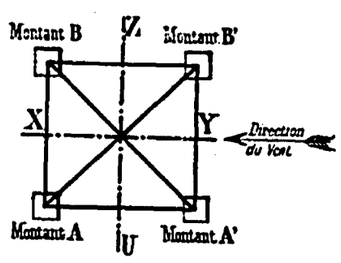


Fig. 22. — Plan de la Tour.

que pour les sections de la partie inférieure. La distance polaire de chacun d'eux est égale au quart du moment de renversement M divisé par le demi-écartement des montants à la base, soit $50^m,70$.

Dans la première hypothèse, nous avons vu que le moment de renversement est de 216.866.479 m. k. (voir p. 32). On a donc $v_1 = \frac{1}{4} \times \frac{216.866.479}{50,70} = 1.069.350$ kilos.

Dans la deuxième hypothèse, le moment de renversement est de 215.388.260 m. k. et la distance polaire est de $v_{II} = \frac{1}{4} \times \frac{215.388.260}{50,70} = 1.062.050$ kilos.

Les efforts tranchants sont également déterminés dans les mêmes polygones.

c) Moments fléchissants.

Le couple qui les produit peut se décomposer en deux; l'un μ qui agit dans un plan parallèle à la direction du vent XY, l'autre transversal μ' qui agit dans un plan perpendiculaire ZU (fig. 22).

Le premier est dû au désaxement de la force extérieure dans le sens de la direction du vent, et le second

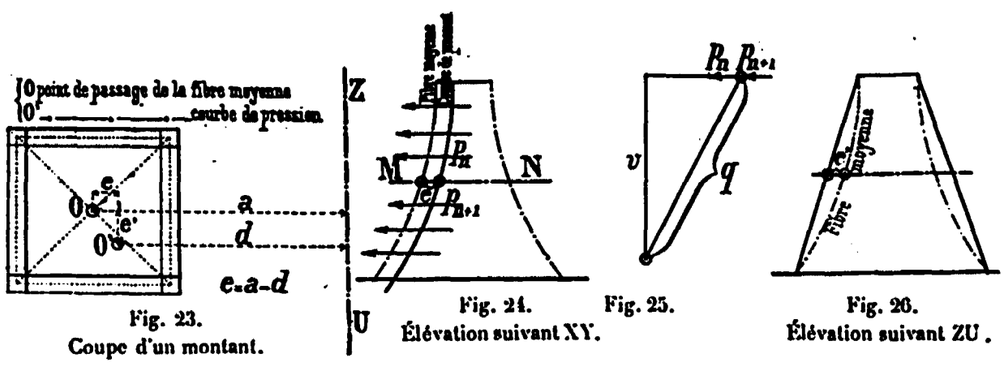


Fig. 23. Coupe d'un montant. Fig. 24. Élévation suivant XY. Fig. 25. Fig. 26. Élévation suivant ZU.

au désaxement dans le sens normal à la direction du vent, ainsi que l'indiquent les figures 23, 24, 25 et 26 ci-dessus.

d) Détermination des moments parallèles à la direction du vent.

Pour la détermination de ces moments, il faut avoir les projections de la courbe de pression sur les plans XY et ZU.

La première est donnée par le polygone funiculaire (fig. 15, p. 34) correspondant aux forces horizontales de renversement (Pl. XXXII, fig. 3).

En appelant e l'écartement horizontal de cette courbe de pression par rapport à la fibre moyenne pour une section quelconque MM' (fig. 27), le moment fléchissant de la force extérieure F est égal à $F\delta$, δ étant la distance normale : par suite de triangles semblables formés avec le polygone des forces, $\frac{e}{\delta} = \frac{F}{v}$; donc $F\delta = ve$. Nous désignerons ce moment dans le plan vertical par μ_v; on aura ainsi $\mu_v = ve$.

Ce moment doit être projeté suivant la face du montant. Pour cela, il suffit de représenter le moment μ_v, agissant dans le plan XY, par son axe représentatif et de le composer avec le moment μ_r cherché, dont l'axe est perpendiculaire au plan de la face B du montant; on a ainsi $\mu_r = \frac{\mu_v}{\sin \alpha_v}$, α_v étant l'inclinaison de la face du montant sur l'horizontale (fig. 28).

Il est facile de calculer l'expression $\frac{\mu_v}{\sin \alpha_v}$. En effet $e = a - d$ (fig. 23), c'est-à-dire la différence entre l'abscisse de la fibre moyenne, par rapport à l'axe vertical dans le plan vertical des montants, donnée par le

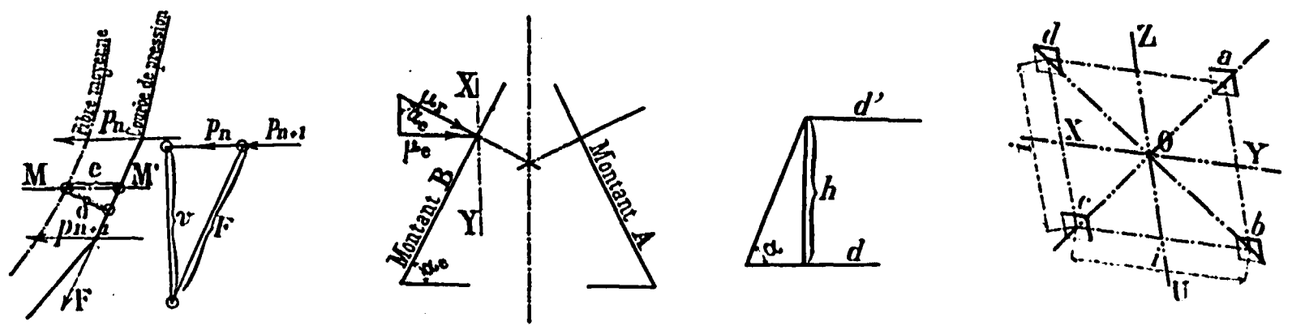


Fig. 27. Fig. 28. Fig. 29. Fig. 30.

diagramme de l'élévation (Pl. XXXI) et l'abscisse de la courbe de pression qui se calcule à l'aide des moments de renversement. Comme $M = dv$, on en tire $d = \frac{M}{v}$.

Les valeurs de M sont calculées numériquement à l'aide du tableau de la page 33, comme nous l'avons fait pour la partie supérieure, par les mêmes formules $M_{n+1} = M_n + T_{n+1} h_n$.

Quant aux angles α, ils sont déterminés sur le même diagramme de l'élévation par leur tangente (fig. 29) : h étant la hauteur du panneau dont d et d' sont les abscisses, $tg\ \alpha = \frac{h}{d-d'}$, d'où l'on tire les valeurs de sin α.

Enfin v est la distance polaire, égale à $\frac{V}{4}$, des polygones des forces (Pl. XXXII, fig. 1 et 2).

Quant à l'effort produit dans les arbalétriers sous l'action du moment μ_r, il est égal pour une face à $E_a = \frac{I}{2} \times \frac{\mu_r}{i}$, i désignant l'écartement normal des arbalétriers dans leurs faces rabattues (fig. 30).

Le tableau ci-dessous résume tous les éléments pour les deux hypothèses.

Calcul des efforts dans les arbalétriers dus aux moments fléchissants agissant dans le plan parallèle à la direction du vent.

NUMÉROS DES SECTIONS.	ABSCISSE DE LA FIBRE MOYENNE a.	$\sin \alpha_c$.	ÉCARTEMENT NORMAL DES FACES DU MONTANT i.	VENT DE 300 KILOS. PREMIÈRE HYPOTHÈSE. MOMENT TOTAL DES EFFORTS DU VENT $M = dv_I$.	ABSCISSE DE LA COURBE DE PRESSION $d = \frac{M}{v_I}$	$e = a - d$.	MOMENT DANS LE MONTANT DANS LE PLAN VERTICAL $\mu_c = ev_I$.	MOMENT DANS LE MONTANT DANS LA FACE DU MONTANT $\mu_r = \frac{\mu_c}{\sin \alpha_c}$.	EFFORT DU AU MOMENT μ_r DANS UN ARBALÉTRIER $E_2 = \frac{\mu_r}{2i}$.	VENT DE 200 A 400 KILOS. DEUXIÈME HYPOTHÈSE. MOMENT TOTAL DES EFFORTS DU VENT $M = dv_{II}$.	ABSCISSE DE LA COURBE DE PRESSION $d = \frac{M}{v_{II}}$	$e = a - d$.	MOMENT DANS LE MONTANT DANS LE PLAN VERTICAL $\mu_c = ev_{II}$.	MOMENT DANS LE MONTANT DANS LA FACE DU MONTANT $\mu_r = \frac{\mu_c}{\sin \alpha_c}$.	EFFORT DU AU MOMENT μ_r DANS UN ARBALÉTRIER $E_2 = \frac{\mu_r}{2i}$.
	m		m	m.k	m	m	m.k	m.k	k	m k	m	m	m.k	m.k	k
XVIII...	11,585	0,981	10,30	54.301.719	12,695	—1,11	—1.180.000	—1.200.000	—58.000	63.401.336	14,92	—3,335	—3.550.000	—3.600.000	—174.000
XIX....	13,50	0,981	11,00	61.994.919	14,49	—0,99	—1.060.000	—1.080.000	—49.000	71.586.536	16,85	—3,35	—3.560.000	—3.620.000	—164.000
XX....	15,50	0,980	12,00	70.905.639	16,57	—1,07	—1.140.000	—1.160.000	—48.400	80.874 902	19,04	—3,54	—3.760.000	—3.840.000	—160 000
XXI....	17,90	0,976	12,70	81 682.119	19,10	—1,20	—1.280.000	—1.310.000	—51.700	91.805.422	21,63	—3,73	—3.970.000	—4.060.000	—160.000
XXII...	20,60	0,970	13,40	93.070.359	21,90	—1,30	—1 390.000	—1.430.000	—54.000	103.929.752	24,46	—3,86	—4.100.000	—4.210.000	—160.000
XXIII...	23,85	0,958	14,30	107.347.099	25,10	—1,25	—1.340.000	—1.400.000	—49.000	117.337.322	27,62	—3,77	—4.020.000	—4.200.000	—146.000
XXIV...	26,62	0,929	14,10	117.257.559	27,41	—0,79	— 840.000	— 905.000	—32.000	126.823.022	29,85	—3,23	—3.440.000	—3.700.000	—131.000
XXV....	32,15	0,893	13,67	135.004.849	31,56	+0,59	+ 630.000	+ 705.000	+25.700	143.410.142	33,76	—1,61	—1.720.000	—1.920.000	— 70.000
XXVI...	37,68	0,893	13,67	155.988.559	36,47	+1,21	+1.300.000	+1.450.000	+53.000	162.424.852	38,23	—0,55	— 585.000	— 650.000	— 23.700
XXVII..	43,21	0,893	13,67	180.136.639	42,11	+1,10	+1.170.000	+1.310.000	+48.000	183.728.442	43,25	—0,04	— 42.500	— 47.500	— 1.700
XXVIII.	48,74	0,893	13,67	206.903.929	48,37	+0,37	+ 395.000	+ 440.000	+16.000	206.865.512	48,70	+0,01	+ 42.500	+ 47.500	+ 1.700

En ce qui concerne les signes, nous donnons toujours le signe positif aux couples qui tournent autour du centre O du montant dans le sens des aiguilles d'une montre.

Pour une valeur positive de μ_r, cette valeur de E_2 est une compression sur l'arbalétrier *a* et un effort de tension sur l'arbalétrier *c*, aussi bien quand le vent agit dans la direction XY que quand il agit dans la direction UZ.

Au contraire, pour les arbalétriers *b* et *d*, l'effort E_2 représente, soit de la tension, soit de la compression, suivant que le vent agit dans l'une ou l'autre de ces directions.

On a donc, en supposant positifs les efforts de compression :

Dans l'arbalétrier *a*, un effort $+ E_1 = + \frac{\mu_r}{2i}$.

« *c*, « $- E_2 = - \frac{\mu_r}{2i}$.

Quand le vent agit suivant la direction XY, on a :

Dans l'arbalétrier *b*, un effort $+ E_2 = + \frac{\mu_r}{2i}$.

« *d*, « $- E_2 = - \frac{\mu_r}{2i}$.

Quand il agit dans la direction UZ, les efforts dans ces deux arbalétriers changent de signe.

e) Détermination des moments normaux à la direction du vent.

Les efforts dus aux *moments fléchissants transversaux* μ' se déterminent d'une manière analogue.

Le moment fléchissant μ'_c de la section MN, produit par le désaxement de la force extérieure dans le plan vertical UZ normal au vent, est égal au produit de la distance polaire v du polygone des forces par l'écartement horizontal e' de la fibre moyenne et de la corde (fig. 26); c'est-à-dire que l'on a $\mu'_c = ve'$; ce moment agit dans le plan vertical UZ.

Pour obtenir le moment correspondant rabattu dans la face, on fera une décomposition analogue à celle qui a déjà été faite pour le couple μ_r du plan XY parallèle à la direction du vent.

On trouve ainsi dans la face du montant un moment qui est égal à $\mu'_r = \frac{\mu'_r}{\sin \alpha_r}$ et qui produit dans les arbalétriers a, b, c, d des efforts $E_3 = \frac{\mu'_r}{2i}$.

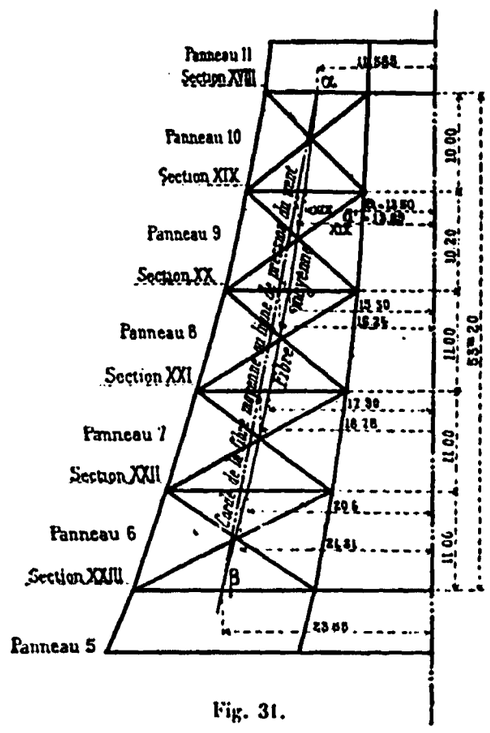


Fig. 31.

Ces efforts sont toujours positifs pour l'arbalétrier a, et négatifs pour l'arbalétrier c, en supposant μ'_r positif. C'est-à-dire qu'on a :

Dans l'arbalétrier a, un effort de $+ E_3 = + \frac{\mu'_r}{2i}$

« « c, « $- E_3 = - \frac{\mu'_r}{2i}$

Quand le vent agit suivant la direction XY, on a :

Dans l'arbalétrier b, un effort de $- E_3 = - \frac{\mu'_r}{2i}$

« « d, « $+ E_3 = + \frac{\mu'_r}{2i}$

Quand il agit dans la direction UZ, les efforts dans ces deux derniers arbalétriers changent de signe.

Ces moments ont été calculés pour les sections XIX, XX, XXI et XXII dans le tableau ci-dessous par la méthode que nous venons d'indiquer. Dans toutes les autres sections, ils sont nuls.

Dans le sens normal au vent, les efforts se transmettent suivant la corde de la fibre moyenne entre deux ceintures.

Les abscisses d de cette corde, ainsi que les abscisses a de la fibre moyenne, sont indiquées dans la figure 31 ci-dessus et se trouvent dans le tableau qui donne aussi les valeurs $e' = a - d'$, celles de sin α, de i, ainsi que les moments $\mu'_r = e'v$ et $\mu'_r = \frac{\mu'_r}{\sin \alpha_r}$ qui correspondent aux deux hypothèses de surcharge du vent, et les efforts $E_3 = \frac{\mu'_r}{2i}$.

Calcul des efforts dans les arbalétriers dus aux moments transversaux.

NUMÉROS DES SECTIONS.	ABSCISSE DE LA FIBRE MOYENNE a	ABSCISSE DE LA LIGNE DE PRESSION d'	$e' = a - d'$	sin α_r	i	VENT DE 300 KILOS — MOMENTS TRANSVERSAUX DANS LE PLAN VERTICAL $\mu'_r = e'v_1$	VENT DE 300 KILOS — MOMENTS TRANSVERSAUX DANS LA FACE DU MONTANT $\mu'_r = \frac{\mu'_r}{\sin \alpha_r}$	VENT DE 300 KILOS — EFFORT DU AU MOMENT μ'_r DANS UN ARBALÉTRIER $E_3 = \frac{\mu'_r}{2i}$	VENT DE 200 A 400 KILOS — MOMENTS TRANSVERSAUX DANS LE PLAN VERTICAL $\mu'_r = e'v_{11}$	VENT DE 200 A 400 KILOS — MOMENTS TRANSVERSAUX DANS LA FACE DU MONTANT $\mu'_r = \frac{\mu'_r}{\sin \alpha_r}$	VENT DE 200 A 400 KILOS — EFFORT DU AU MOMENT μ'_r DANS UN ARBALÉTRIER $E_3 = \frac{\mu'_r}{2i}$
	m	m	m		m	m.k	m.k	k	m.k	m.k	k
XIX	13,50	13,89	— 0,39	0,981	11,00	— 416.000	— 423.000	— 19.000	— 415.000	— 421.000	— 19.000
XX	15,50	16,24	— 0,74	0,980	12,00	— 790.000	— 805.000	— 33.600	— 785.000	— 800.000	— 33.500
XXI	17,90	18,78	— 0,88	0,976	12,70	— 940.000	— 965.000	— 38.000	— 935.000	— 960.000	— 37.600
XXII	20,60	21,31	— 0,71	0,970	13,40	— 760.000	— 785.000	— 29.700	— 755.000	— 780.000	— 29.500

Nota. — Dans les autres sections, les moments transversaux sont nuls.

f) Calcul des efforts totaux dus au vent dans les arbalétriers et coefficients de travail maximums.

Nous avons maintenant tous les éléments pour résumer les efforts totaux dans les arbalétriers ; c'est-à-dire les efforts longitudinaux suivant la fibre moyenne et les efforts dus au couple de désaxement.

Ces efforts, en supposant les moments μ_r et μ'_r positifs, sont :

Dans l'arbalétrier a, un effort $E_a = E_1 + E_2 + E_3$

« c, « $E_c = E_1 - E_2 - E_3$

Quand le vent agit suivant XY, on a :

Dans l'arbalétrier b, un effort $E_b = E_1 + (E_2 - E_3)$

« d, « $E_d = E_1 - (E_2 - E_3)$

Quand le vent agit suivant UZ, on a :

Dans l'arbalétrier b, un effort $E'_b = E_1 - (E_2 - E_3)$

« d, « $E'_d = E_1 + (E_2 - E_3)$

Comme le vent peut agir soit sur une face soit sur l'autre, nous choisirons le cas qui donne sur les arbalétriers *b* ou *d* les plus grands efforts, lesquels sont ainsi de :

$$E_{bd} = E_1 + (E_2 - E_3) \quad \text{si} \quad E_2 - E_3 > o$$
$$E_{bd} = E_1 - (E_2 - E_3) \quad \text{si} \quad E_2 - E_3 < o$$

Ces efforts sont résumés dans le tableau ci-dessous pour les deux hypothèses.

Calcul des efforts totaux dus au vent dans les arbalétriers.

NUMÉROS DES SECTIONS.	VENT DE 300 KILOS. EFFORT DE COMPRESSION TOTAL DANS LE MONTANT N.	EFFORT DE COMPRESSION PAR ARBALÉTRIER a, b, c ou d $E_1 = \frac{N}{4}$.	EFFORT DU AU MOMENT μ_P DANS UN ARBALÉTRIER $E_2 = \frac{\mu_P}{2l}$	EFFORT DU AU MOMENT μ'_P DANS UN ARBALÉTRIER $E_3 = \frac{\mu'_P}{2l}$.	EFFORTS TOTAUX DANS LES ARBALÉTRIERS a $E_a = E_1 + E_2 + E_3$.	c $E_c = E_1 - E_2 - E_3$.	b ou d $E_{bd} = E_1 \pm (E_2 - E_3)$	VENT DE 200 A 400 KILOS. EFFORT DE COMPRESSION TOTAL DANS LE MONTANT N.	EFFORT DE COMPRESSION PAR ARBALÉTRIER a, b, c ou d $E_1 = \frac{N}{4}$.	EFFORT DU AU MOMENT μ_P DANS UN ARBALÉTRIER $E_2 = \frac{\mu_P}{2l}$	EFFORT DU AU MOMENT μ'_P DANS UN ARBALÉTRIER $E_3 = \frac{\mu'_P}{2l}$.	EFFORTS TOTAUX DANS LES ARBALÉTRIERS a $E_a = E_1 + E_2 + E_3$.	c $E_c = E_1 - E_2 - E_3$.	b ou d $E_{bd} = E_1 \pm (E_2 - E_3)$.
	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.
XVIII. . .	1.105.000	270.250	—58.000	0	218.250	334.250	334.250	1.100.000	275.000	—174.000	0	101.000	449.000	449.000
XIX. . . .	1.108.000	277.000	—49.000	—19.000	209.000	345.000	307 000	1.105.000	276.250	—164.000	—19.000	93.250	459.250	421.250
XX.	1.115.000	278.750	—48.400	—33.000	196.750	360.750	293.550	1.110.000	277.500	—160.000	—33.500	84.000	471.000	404.000
XXI. . . .	1.124 000	281.000	—51.700	—38.000	191.300	370.700	294.700	1.115.000	278.750	—160.000	—37.600	81.150	476.350	401.150
XXII	1.140.000	285.000	—54.000	—29.700	201.300	368.700	309.300	1.128.000	282.000	—160.000	—29.500	92.500	471.500	412.500
XXIII. . . .	1.155.000	288.750	—49.000	0	239.750	337.750	337.750	1.142.000	285.500	—146.000	0	139.500	431.500	431.500
XXIV. . . .	1.200.000	300.000	—32.000	0	268.000	332.000	332.000	1.183.000	295 750	—131.000	0	164.750	426.750	426.750
XXV.	1.240.000	310.000	+25.700	0	335.700	284.300	335.700	1.225.000	306.250	— 70.000	0	236.250	376.250	376.250
XXVI. . . .	1.278.000	319.500	+53.000	0	372.500	266 500	372.500	1.250.000	312.500	— 23.700	0	288.800	336.200	336.200
XXVII. . .	1.313.000	328.250	+48.000	0	376.250	280.250	376.250	1.275 000	318.750	— 1.700	0	317.050	320.450	320.450
XXVIII. .	1.342.000	335.500	+16.000	0	351.500	319.500	351.500	1.295.000	323.750	+ 1.700	0	320.450	317.050	320.450

Il est facile d'en déduire le coefficient de travail des arbalétriers, dont la section est connue; c'est ce que nous donne le tableau ci-dessous :

Calcul des coefficients maximums de travail dus au vent dans les arbalétriers.

NUMÉROS DES SECTIONS.	SURFACES DE SECTION DES ARBALÉTRIERS m/m². a.	c.	b ou d.	VENT DE 300 KILOS. EFFORTS MAXIMUMS DUS AU VENT DANS LES ARBALÉTRIERS. a.	c.	b ou d.	COEFFICIENTS DE TRAVAIL MAXIMUMS DUS AU VENT. a.	c.	b ou d.	VENT DE 200 A 400 KILOS. EFFORTS MAXIMUMS DUS AU VENT DANS LES ARBALÉTRIERS. a.	c.	b ou d.	COEFFICIENTS DE TRAVAIL MAXIMUMS DUS AU VENT. a.	c.	b ou d.
				k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.
XVIII.	43.136	56.308	55.664	218.250	334.250	334.250	5,05	5,86	6,0	101.000	449.000	449.000	2,35	7,96	8,1
XIX.	51.664	63.832	55.664	209.000	345.000	307.000	3,97	5,44	5,53	93.250	459.250	421.250	1,77	7,24	7,63
XX	51.664	59.616	55.622	196.750	360 750	293.550	3,74	6,00	5,28	84.000	471.000	404.000	1,61	7,9	7,28
XXI.	51.584	59.424	59.736	191.300	370.700	294.700	3,7	6,27	4,99	81.150	476.350	401.150	1,5	7,97	6,69
XXII.	51.424	67.544	67.908	201.300	368.700	309.300	3,89	5,44	4,61	92.500	471.500	412.500	1,79	6,94	6,11
XXIII.	51.024	66.928	67.376	239.750	337.750	337.750	4,66	5,02	5,02	139.500	431.500	431.500	2,66	6.42	6,42
XXIV.	82.824	77.892	77.892	268.000	332.000	332 000	3,16	4,3	4,26	164.750	426.750	426.750	1,96	5,5	5,46
XXV.	79 992	84.792	84.792	335.700	284.300	335.700	4,16	3,32	3,95	236.250	376.250	376.250	2,96	4,42	4,45
XXVI	84.792	87.992	87 992	372.500	266.500	372.500	4,33	3,06	4,20	288.800	336.200	336.200	3,43	3,86	3,99
XXVII.	87.992	87 992	91.192	376.250	280.250	376.250	4,26	3,19	4,15	317.050	320.450	320.450	3,56	3,99	3,55
XXVIII.	95.992	87.992	91.192	351.500	319.500	351.500	3,6	3,7	3,87	320.450	317.050	320.450	3,31	3,6	3,57

Ces coefficients devront être ajoutés à ceux dus aux poids propres.

g) Calcul des efforts dus au vent dans les barres de treillis et coefficients de travail correspondants.

Ces efforts, ainsi que les coefficients de travail correspondants, sont résumés dans le tableau ci-dessous :

NUMÉROS DES PANNEAUX.	COMPOSITION D'UNE BARRE.	SURFACE DE LA SECTION D'UNE BARRE m/m².	EFFORT TRANCHANT DANS UNE BARRE. VENT 300k.	EFFORT TRANCHANT DANS UNE BARRE. VENT DE 200 A 400k.	COEFFICIENT DE TRAVAIL. VENT 300k.	COEFFICIENT DE TRAVAIL. VENT DE 200 A 400k.
			k.	k.	k.	k.
9.	4 corn. 80 × 80 × 9	5.436	4.200	8.200	0,74	1,49
8.	Id.	5.436	4.000	4.500	0,75	0,85
7.	Id.	5.436	400	1.650	0,08	0,28
6.	Id.	5.436	4.600	2.850	0,86	0,46
5.	»	»	0	0	0	0

NUMÉROS DES PANNEAUX.	COMPOSITION D'UNE BARRE.	SURFACE DE LA SECTION D'UNE BARRE m/m².	EFFORT TRANCHANT DANS UNE BARRE. VENT 300k.	EFFORT TRANCHANT DANS UNE BARRE VENT DE 200 A 400k.	COEFFICIENT DE TRAVAIL. VENT 300k.	COEFFICIENT DE TRAVAIL. VENT DE 200 A 400k.
			k.	k.	k.	k.
4.	4 corn. 100 × 100 × 12	9.024	51.000	54.750	5,62	6,02
3.	4 corn. 80 × 80 × 10	6.000	24.100	35.300	4,02	5,82
2.	Id.	6.000	2.600	14.100	0,45	2,45
1.	4 corn. 100 × 100 × 11	8 316	25.250	0	3,0	0

§ 8. — Hypothèse d'un vent agissant dans une direction quelconque.

Nous avons admis dans les calculs précédents l'hypothèse d'un vent frappant la Tour normalement à l'une de ses faces; nous allons examiner maintenant le cas d'un vent agissant dans une direction quelconque et montrer que les efforts qu'il produit sont égaux ou inférieurs à ceux déjà calculés.

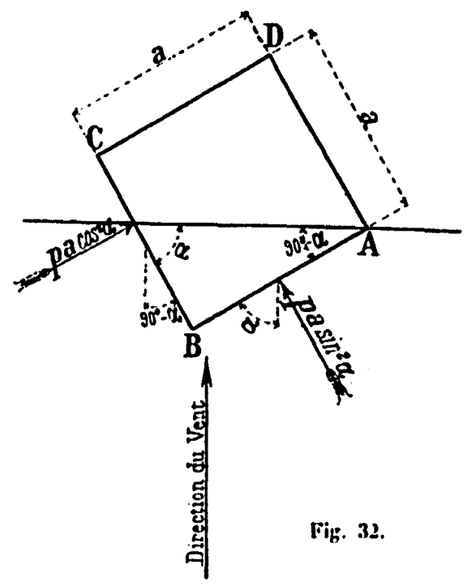


Fig. 32.

Dans ce but, considérons un prisme quadrangulaire ABCD de largeur a, et d'une hauteur égale à l'unité (fig. 32).

Si un vent d'une intensité p agit normalement à l'une de ses faces, il produit sur le prisme un effort pa.

Quand, au contraire, le vent rencontre la face AB du prisme sous un angle α, il produit sur cette face un effort normal qui a pour valeur $pa \sin^2\alpha$. L'effort correspondant du vent sur la face CB est égal à $pa \cos^2\alpha$.

Si donc P_1, P_2, ... P_n représentent les efforts du vent agissant sur la Tour normalement à l'une de ses faces, un vent de même intensité, venant frapper la face AB sous un angle α, produira sur cette face des efforts $P_1 \sin^2\alpha$, $P_2 \sin^2\alpha$ ... $P_n \sin^2\alpha$ et sur la face normale CB des efforts $P_1 \cos^2\alpha$, $P_2 \cos^2\alpha$ ... $P_n \cos^2\alpha$.

Il suffira, par conséquent, d'examiner séparément les efforts produits par les forces $P \sin^2\alpha$ normales à la face AB et ceux que donnent les forces $P \cos^2\alpha$ normales à la face BC, d'en faire ensuite la somme pour avoir les efforts totaux dus au vent.

a) *Partie supérieure de la Tour.* — Nous avons vu que lorsque le vent agit normalement à une face, l'effort E qu'il produit dans tous les arbalétriers d'une face est $E = \frac{M}{e}$ (page 32).

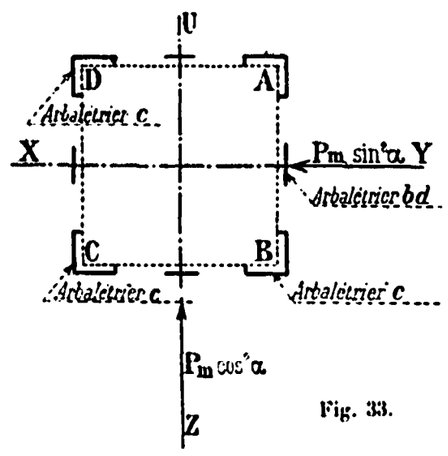


Fig. 33.

Le coefficient de travail correspondant est donc égal à $R = \frac{E}{\omega}$, ω étant la surface de la section de tous les arbalétriers d'une face.

Dans le cas actuel, les composantes $P_1 \sin^2\alpha$, $P_2 \sin^2\alpha$ normales à la face AB, étant proportionnelles aux forces correspondantes du vent venant frapper la face normalement, produisent dans les arbalétriers de la face CD, un coefficient de travail qui a pour valeur $R_{CD} = \frac{E \sin^2\alpha}{\omega}$.

De même, les composantes $P_1 \cos^2\alpha$, $P_2 \cos^2\alpha$,... normales à la face CB produisent dans les arbalétriers de la face AD un coefficient de travail égal à $R_{AD} = \frac{E \cos^2\alpha}{\omega}$.

Le coefficient de travail de l'arbalétrier d'angle en D, le plus fatigué, a pour valeur :

$$R' = R_{CD} + R_{AD} = \frac{E \sin^2\alpha}{\omega} + \frac{E \cos^2\alpha}{\omega} = \frac{E}{\omega}.$$

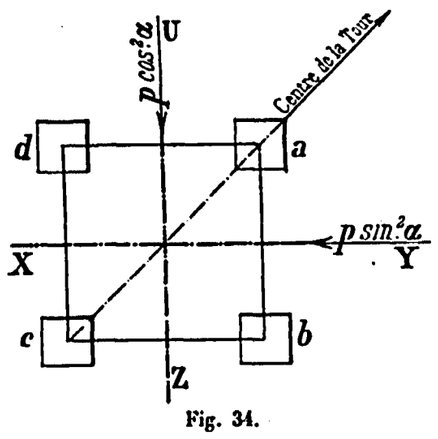


Fig. 34.

Il est par conséquent identique à celui que donne le vent lorsqu'il agit normalement à l'une des faces AB ou CB.

b) *Partie inférieure de la Tour.* — Occupons-nous d'abord des forces du vent $p_1 \sin^2\alpha$, $p_2 \sin^2\alpha$..., qui agissent suivant la direction XY sur la face *ab* du montant (fig. 34).

La courbe de pression de ces forces est la même que dans le cas d'un vent normal, puisque le rapport $\frac{p_1 \sin^2\alpha}{p_1}$, $\frac{p_2 \sin^2\alpha}{p_2}$..., de chacune de ces forces dans les deux cas est constant et égal à $\sin^2\alpha$.

Les efforts que ces forces engendrent sont donc aussi dans le même rapport, c'est-à-dire que l'on a dans les arbalétriers *a* et *c* (voir p. 40) des efforts de

$$e_a = E_a \sin^2\alpha \qquad e_c = E_c \sin^2\alpha$$

et dans les arbalétriers *b* et *d*

$$e_b = E_b \sin^2\alpha = (E_1 + E_2 - E_3)\sin^2\alpha$$
$$e_d = E_d \sin^2\alpha = [E_1 - (E_2 - E_3)]\sin^2\alpha.$$

Si maintenant nous considérons les forces $p_1\cos^2\alpha$, $p_2\cos^2\alpha$,... de la direction UZ normale à la face *ad*, on trouvera de même qu'elles produisent dans les arbalétriers *a* et *c* des efforts de :

$$e'_a = E_a\cos^2\alpha \qquad e'_c = E_c\cos^2\alpha$$

Les efforts correspondants e'_b et e'_d des arbalétriers *b* et *d* sont égaux aux efforts E'_b et E'_d qui ont été trouvés précédemment et qui correspondent à la direction UZ du vent, multipliés par $\cos^2\alpha$. C'est-à-dire que l'on a :

$$e'_b = E'_b\cos^2\alpha = [E_1 - (E_2 - E_3)]\cos^2\alpha$$
$$e'_d = E'_d\cos^2\alpha = (E_1 + E_2 - E_3)\cos^2\alpha.$$

En faisant la somme des efforts correspondants, on trouve les efforts totaux dans les arbalétriers.

Dans l'arbalétrier *a*, on a un effort total de :

$$E''_a = e_a + e'_a = E_a(\sin^2\alpha + \cos^2\alpha) = E_a$$

Dans l'arbalétrier *c*, on a un effort total de :

$$E''_c = e_c + e'_c = E_c(\sin^2\alpha + \cos^2\alpha) = E_c$$

et dans les arbalétriers *b* et *d*, des efforts totaux de :

$$E''_b = e_b + e'_b = E_1(\sin^2\alpha + \cos^2\alpha) + (E_2 - E_3)(\sin^2\alpha - \cos^2\alpha)$$

ou
$$E''_b = E_1 + (E_2 - E_3)(\sin^2\alpha - \cos^2\alpha)$$

et
$$E''_d = E_1 - (E_2 - E_3)(\sin^2\alpha - \cos^2\alpha)$$

On voit que, dans les arbalétriers de diagonale *a* et *c*, les efforts sont absolument les mêmes que lorsque le vent agit normalement aux faces, dans la direction XY ou dans la direction UZ.

Dans les arbalétriers *b* ou *d*, l'effort maximum est moins grand, puisque le terme $\pm(E_2 - E_3)$, que nous pouvons toujours admettre positif soit pour l'arbalétrier *b* soit pour *d*, est multiplié par le facteur $(\sin^2\alpha - \cos^2\alpha)$, qui est plus petit que l'unité.

Le cas d'un vent oblique n'est donc pas à considérer, puisqu'il produit, dans toutes les parties de l'ossature de la Tour, des efforts égaux ou inférieurs à ceux résultant du vent normal à l'une des faces.

CHAPITRE IV

COEFFICIENTS DE TRAVAIL MAXIMUM RÉSULTANT DES CHARGES ET DU VENT

Nous pouvons maintenant calculer les coefficients de travail maximum résultant de l'action simultanée des charges verticales et du vent.

§ 1. — Arbalétriers.

a) *Partie supérieure.* — Les tableaux pages 22 et 34 nous ont donné les éléments des tableaux ci-dessous pour la partie supérieure, allant du sommet à la deuxième plate-forme.

NUMÉROS DES SECTIONS.	COEFFICIENTS DE TRAVAIL		
	CHARGES VERTICALES R_1.	VENT DE 3m à R_2.	TOTAL $R_1 + R_2$.
	k.	k.	k.
I	1,5	2,0	3,5
II	1,5	2,3	3,8
III	1,65	3,0	4,65
IV	1,8	3,7	5,5
V	2,0	4,5	6,5
VI	2,2	5,4	7,6
VII	2,4	6,3	8,7
VIII	2,1	5,6	7,7
IX	2,25	6,4	8,65
X	2,75	7,0	9,75
XI	2,4	6,4	8,8
XII	2,25	6,5	8,75
XIII	2,5	7,1	9,6
XIV	2,35	6,8	9,15
XV	2,4	6,9	9,3
XVI	2,55	7,2	9,75
XVII	2,6	7,4	10,00

NUMÉROS DES SECTIONS.	COEFFICIENTS DE TRAVAIL		
	CHARGES VERTICALES R_1.	VENT DE 2m à 4m. R'_2.	TOTAL. $R_1 + R'_2$.
	k.	k.	k.
I	1,5	2,6	4,1
II	1,5	2,9	4,4
III	1,65	3,8	5,45
IV	1,8	4,7	6,5
V	2,0	5,7	7,7
VI	2,2	6,8	9,0
VII	2,4	8,0	10,4
VIII	2,1	6,9	9,0
IX	2,25	7,9	10,15
X	2,75	8,7	11,45
XI	2,4	7,9	10,3
XII	2,25	7,9	10,15
XIII	2,5	8,6	11,1
XIV	2,35	8,2	10,55
XV	2,4	8,3	10,7
XVI	2,55	8,5	11,05
XVII	2,6	8,8	11,4

Ce tableau met bien en évidence la prépondérance de l'action du vent sur celle des charges verticales pour la partie supérieure de la Tour.

b) *Partie inférieure.* — Pour la partie inférieure, les éléments des tableaux ci-dessous nous sont donnés par les tableaux pages 28 et 41 (voir fig. 34, p. 42 pour la position des arbalétriers *a*, *b*, *c*, *d*).

NUMÉROS DES SECTIONS.	COEFFICIENTS DE TRAVAIL								
	CHARGES VERTICALES R_1.			VENT DE 3m à R_2.			TOTAL $R_1 + R_2$.		
	a.	*c*.	*b* ou *d*	*a*.	*c*.	*b* ou *d*.	*a*.	*c*.	*b* ou *d*.
XVIII	4,95	2,74	3,30	5,05	5,86	6,0	10,00	8,6	9,3
XIX	3,93	3,06	3,57	3,97	5,44	5,53	7,9	8,5	9,1
XX	3,96	3,70	3,82	3,74	6,00	5,28	7,7	9,7	9,1
XXI	4,20	4,03	3,81	3,70	6,27	4,99	7,9	10,3	8,8
XXII	4,71	3,66	3,59	3,89	5,44	4,61	8,6	9,1	8,2
XXIII	5,54	3,58	3,88	4,66	5,02	5,02	10,2	8,6	8,9
XXIV	7,24	4,90	6,34	3,16	4,3	4,26	10,4	9,2	10,6
XXV	7,44	7,48	7,25	4,16	3,32	3,95	11,6	10,8	11,2
XXVI	7,07	8,04	7,31	4,33	3,06	4,29	11,4	11,1	11,6
XXVII	7,64	8,11	7,55	4,26	3,19	4,15	11,9	11,3	11,7
XXVIII	8,29	7,40	7,93	3,6	3,7	3,87	11,9	11,1	11,8

NUMÉROS DES SECTIONS.	COEFFICIENTS DE TRAVAIL								
	CHARGES VERTICALES. R_1.			VENT DE 2m à 4m à R'_2.			TOTAL $R_1 + R'_2$.		
	a.	*c*.	*b* ou *d*.	*a*.	*c*.	*b* ou *d*.	*a*.	*c*.	*b* ou *d*.
XVIII	4,95	2,74	3,30	2,35	7,96	8,1	7,3	10,7	11,4
XIX	3,93	3,06	3,57	1,77	7,24	7,63	5,7	10,3	11,2
XX	3,96	3,70	3,82	1,64	7,9	7,28	5,6	11,6	11,1
XXI	4,20	4,03	3,81	1,5	7,07	6,69	5,7	12,0	10,5
XXII	4,71	3,66	3,59	1,79	6,94	6,11	6,5	10,6	9,7
XXIII	5,54	3,58	3,88	2,66	6,42	6,42	8,2	10,0	10,3
XXIV	7,24	4,90	6,34	1,96	5,5	5,46	9,2	10,4	11,8
XXV	7,44	7,48	7,25	2,96	4,42	4,45	10,4	11,9	11,7
XXVI	7,07	8,04	7,31	3,43	3,86	3,99	10,5	11,9	11,3
XXVII	7,64	8,11	7,55	3,56	3,69	3,55	11,2	11,8	11,1
XXVIII	8,29	7,40	7,93	3,31	3,6	3,57	11,6	11,0	11,5

§ 2. — Treillis.

Dans la partie supérieure, le treillis ne résiste qu'aux efforts tranchants dus au vent; car, dans cette portion de la Tour, les arbalétriers peuvent être considérés comme verticaux et les charges s'exercent dans cette direction. Les coefficients de travail du treillis sont donc ceux donnés dans le tableau de la page 35.

Les tableaux pages 28 et 41 nous ont donné les éléments des tableaux ci-dessous pour les treillis de la partie inférieure.

NUMÉROS DES PANNEAUX.	SURFACE DE LA SECTION D'UNE BARRE m/m².	EFFORTS SUIVANT UNE BARRE.		COEFFICIENTS DE TRAVAIL.		
		CHARGES VERTICALES	VENT DE 300k.	CHARGES VERTICALES R_1.	VENT DE 300k R_2.	TOTAL R_1+R_2.
		k.	k.	k.	k.	k.
9..... ..	5.436	13.300	4.200	2,46	0,74	3,2
8.....	5.436	3.000	4.000	0,55	0,75	1,3
7.	5.436	12.100	400	2,22	0,08	2,3
6.	5.436	33.400	4.000	6,14	0,86	7,0
5.....	0	0	0	0	0	0
4.....	9 024	34.000	51.000	3,78	5,62	9,4
3...	6 000	5.900	24.100	0,98	4,02	5,0
2.....	6.000	24.900	2.600	4,15	0,45	4,6
1...	8.316	48.500	25.250	5,84	3,0	8,84

NUMÉROS DES PANNEAUX.	SURFACE DE LA SECTION D'UNE BARRE m/m².	EFFORTS SUIVANT UNE BARRE		COEFFICIENTS DE TRAVAIL.		
		CHARGES VERTICALES.	VENT DE 200k A 400k.	CHARGES VERTICALES R_1.	VENT DE 200k A 400k R'_2.	TOTAL $R_1+R'_2$.
		k.	k.	k.	k.	k.
9....	5.436	13.300	8.200	2,46	1,49	3,95
8....	5.436	3.000	4.500	0,55	0,85	1,4
7.....	5.436	12.100	1.650	2,22	0,28	2,5
6.....	5.436	33 400	2.850	6,14	0,46	6,6
5...	0	0	0	0	0	0
4.....	9.024	34.000	54.750	3,78	6,02	9,8
3.....	6.000	5.900	35.300	0,98	5,82	6,8
2..... .. .	6.000	24.900	14.100	4,15	2,45	6,5
1..... . ..	8.316	48.500	0	5,84	0	5,84

§ 3. — Nouvelle hypothèse d'un vent variant de 100 kilos à 300 kilos.

Quoique les coefficients de compression des arbalétriers, inscrits dans les deux tableaux précédents, ne présentent aucune exagération dangereuse, il y a cependant lieu d'observer que, dans la réalité, c'est-à-dire dans les limites maxima de la pratique, ces coefficients sont notablement moins élevés.

Le cas le plus défavorable qui puisse se présenter en dehors des cyclones, est celui d'un vent de 300 kilos à la partie supérieure et de 100 kilos à la surface du sol. Les coefficients qui se rapportent à cette hypothèse, la plus voisine de la réalité, se déduisent des chiffres précédents. L'effort du vent par mètre carré sera donné par la relation $100\,k. + \frac{200}{300}h$; en comparant cette valeur à celle de $200\,k. + \frac{200}{300}h$, correspondant à notre 2^{me} hypothèse, on voit qu'il suffit de retrancher 100 kilos de chacun des efforts du vent inscrits dans la colonne 7 du tableau page 31.

La proportionnalité de ces nouveaux efforts par rapport aux anciens donnera les rapports λ par lesquels devront être multipliés tous les chiffres correspondant à notre 2^{me} hypothèse.

a) Coefficients de travail totaux dans les arbalétriers sous l'effet des charges et d'un vent variant de 100 kilos à 300 kilos.

NUMÉROS DES SECTIONS.	RAPPORT DES EFFORTS DU VENT PAR m². λ.	COEFFICIENTS DE TRAVAIL.		
		CHARGES VERTICALES R_1	VENT R'_2.	TOTAL $R_1+R'_2$.
		k.	k.	k.
I.....	0,73	1,50	1,90	3,4
II.....	0,727	1,50	2,10	3,60
III.....	0,723	1,65	2,70	4,35
IV..... ...	0,720	1,80	3,40	5,20
V.....	0,716	2,00	4,10	6,10
VI.....	0,712	2,20	4,80	7,00
VII	0,708	2,40	5,60	8,00
VIII.....	0,703	2,10	4,90	7,00
IX.....	0,698	2,25	5,50	7,75
X.....	0,692	2,75	6,00	8,75
XI.....	0,685	2,40	5,40	7,80
XII	0,678	2,25	5,30	7,55
XIII.....	0,671	2,50	5,80	8,30
XIV.....	0,663	2,35	5,40	7,75
XV.....	0,654	2,40	5,50	7,90
XVI...	0,646	2,55	5,50	8,05
XVII.....	0,636	2,00	5,60	8,20

NUMÉROS DES SECTIONS.	RAPPORT DES EFFORTS DU VENT PAR m². λ.	COEFFICIENTS DE TRAVAIL								
		CHARGES VERTICALES R_1.			VENT R'_2.			TOTAL $R_1+R'_2$.		
		a.	c.	b ou d.	a.	c.	b ou d.	a.	c.	b ou d.
XVIII....	0,632	4,95	2,74	3,30	1,49	5,03	5,12	6,44	7,77	8,42
XIX.....	0,623	3,93	3,06	3,57	1,10	4,51	4,75	5,03	7,57	8,32
XX	0,612	3,96	3,70	3,82	1,00	4,83	4,46	4,96	8,53	8,28
XXI.....	0,601	4,20	4,03	3,81	0,90	4,79	4,02	5,10	8,82	7,83
XXII.....	0,590	4,71	3,06	3,59	1,06	4,09	3,60	5,77	7,75	7,19
XXIII....	0,578	5,54	3,58	3,88	1,54	3,71	3,71	7,08	7,20	7,59
XXIV....	0,568	7,24	4,90	6,34	1,11	3,12	3,10	8,35	8,02	9,44
XXV.....	0,555	7,44	7,48	7,25	1,64	2,45	2,47	9,08	9,93	9,72
XXVI....	0,537	7,07	8,04	7,31	1,84	2,07	2,14	8,91	10,11	9,45
XXVII ...	0,523	7,64	8,11	7,55	1,86	1,93	1,86	9,50	10,04	9,41
XXVIII...	0,507	8,29	7,40	7,93	1,68	1,83	1,81	9,97	9,23	9,74

Nota. — Les coefficients totaux de travail sous les charges et le vent varient ainsi de 6 à 8 kilos pour la partie supérieure et de 8 à 10 kilos pour la partie inférieure.

Dans la partie supérieure, l'influence du vent est prédominante : elle est le double de celle des charges. C'est l'inverse pour la partie inférieure, et l'influence du vent n'est que le quart de celle des charges.

b) Efforts dans chacun des arbalétriers.

Les tableaux précédents ont donné, pour la partie supérieure, les efforts dans une face mais non ceux

DIAGRAMME des EFFORTS

DANS LES ARBALÉTRIERS *c* ET *a*

sous l'action des *Charges* et d'un *Vent* de 100 à 300 k.

Échelle des hauteurs..... 1 cm. p. m.
— forces..... 1 cm. p. 100T

Arbalétriers c..... Traits pleins.
— *a*..... — pointillés

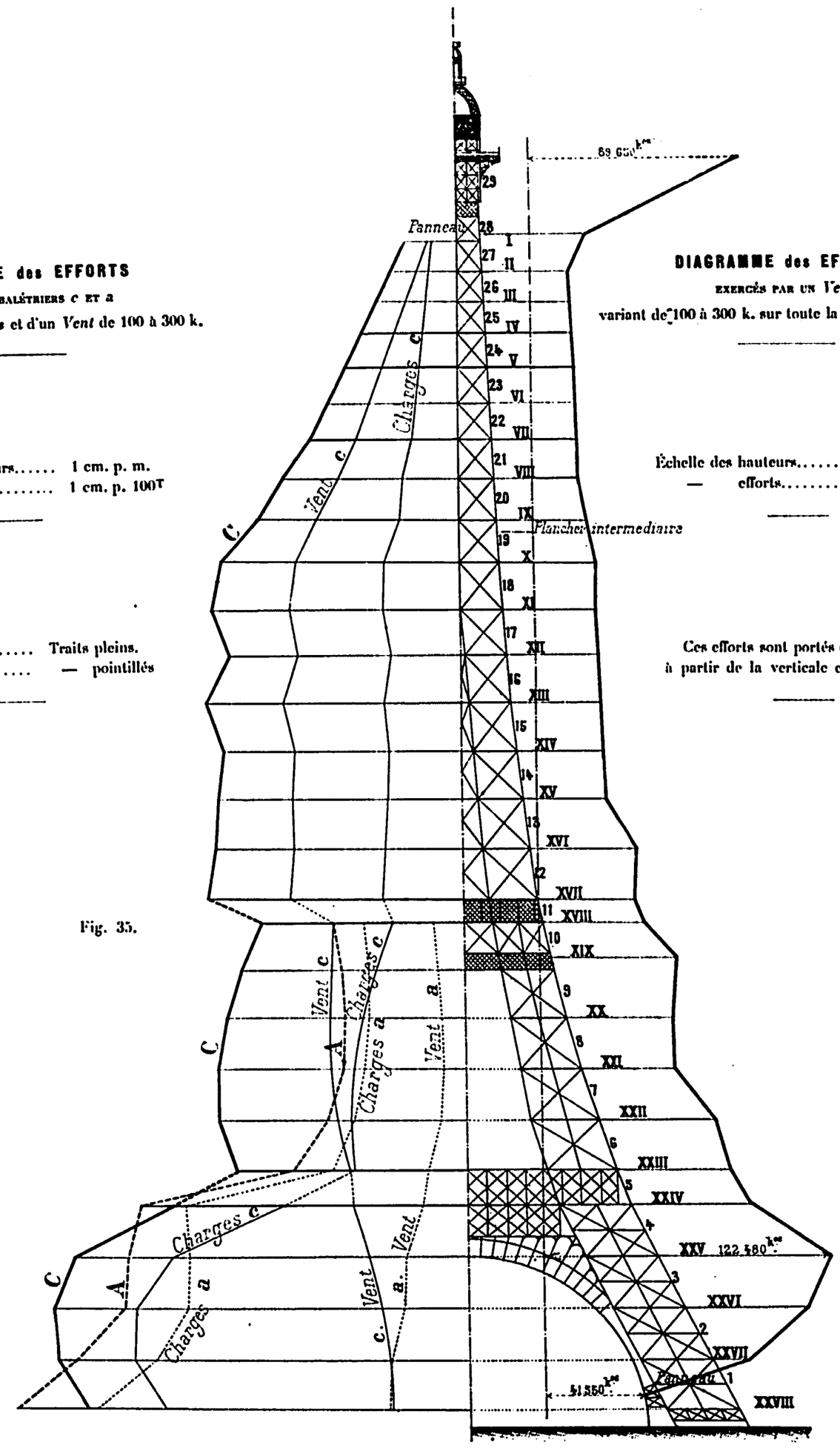


Fig. 35.

DIAGRAMME des EFFORTS

EXERCÉS PAR UN *Vent*

variant de 100 à 300 k. sur toute la surface de la Tour.

Échelle des hauteurs..... 1 cm. p. m.
— efforts..... 0m/m5 p. tonne.

Ces efforts sont portés en abscisses
à partir de la verticale en trait mixte.

relatifs aux arbalétriers; il serait facile de suivre ces derniers du sommet à la base de la Tour : nous ne le ferons que dans la dernière hypothèse à l'aide des coefficients λ ci-dessus.

Nous arrivons ainsi aux tableaux suivants :

Efforts totaux dans les arbalétriers sous l'effet des charges et d'un vent de 100 kilos à 300 kilos.

NUMÉROS DES SECTIONS.	RAPPORT DES EFFORTS DU VENT PAR m². λ.	EFFORTS — CHARGES VERTICALES c.	CHARGES VERTICALES bd ou b ou d.	VENT c.	VENT bd. ou b ou d.	TOTAL c.	TOTAL bd ou b ou d.
		Tonnes	Tonnes	Tonnes	Tonnes	Tonnes	Tonnes
I.....	0,73	48	31	60	39	108	70
II.....	0,727	58	31	81	43	139	74
III.....	0,723	64	34	105	55	169	89
IV.....	0,720	70	37	132	70	202	107
V.....	0,716	78	41	159	84	237	125
VI.....	0,712	85	45	186	98	271	143
VII.....	0,708	93	49	217	114	310	163
VIII.....	0,703	115	43	268	100	383	143
IX.....	0,698	123	46	301	112	424	158
X.....	0,692	159	56	347	122	506	178
XI.....	0,685	162	80	363	181	525	261
XII.....	0,678	147	59	346	139	493	198
XIII.....	0,671	163	66	379	153	542	219
XIV.....	0,663	153	85	353	196	506	281
XV.....	0,654	157	99	359	227	516	326
XVI.....	0,646	167	105	359	227	526	332
XVII.....	0,636	170	107	366	231	536	338

NUMÉROS DES SECTIONS.	RAPPORT DES EFFORTS DU VENT PAR m². λ.	EFFORTS — CHARGES VERTICALES a.	CHARGES VERTICALES c.	CHARGES VERTICALES b ou d.	VENT a.	VENT c.	VENT b ou d	TOTAL a.	TOTAL c.	TOTAL b ou d.
		Tonnes	Tonnes	Tonnes	Tonnes	Tonnes	Tonnes	Tonnes	Tonnes	Tonnes
XVIII....	0,632	214	155	184	64	284	284	278	439	468
XIX.....	0,623	203	195	199	59	286	262	262	481	461
XX.....	0,612	204	221	213	51	288	247	255	509	460
XXI.....	0,601	217	239	228	49	286	241	266	525	469
XXII.....	0,590	241	247	244	55	278	243	296	525	487
XXIII....	0,578	283	240	261	81	250	250	364	490	511
XXIV....	0,568	600	388	494	94	242	242	694	630	736
XXV.....	0,555	595	635	615	131	209	209	726	844	824
XXVI....	0,537	600	708	654	135	181	181	725	889	835
XXVII...	0,523	671	714	693	166	168	168	837	882	861
XXVIII...	0,507	796	652	724	163	162	163	959	814	887

On peut, à l'aide de ces chiffres, établir le diagramme (fig. 35) relatif aux arbalétriers *a* et *c*, en traçant pour chacun d'eux des polygones se rapportant aux charges verticales, au vent, et au total des efforts.

Nous y faisons figurer à droite les efforts correspondants du vent sur chaque élément de la Tour, déduits des tableaux p. 31 et 32 en multipliant par les coefficients λ les efforts correspondant à la 2ᵐᵉ hypothèse.

Pour la partie au-dessus de la section XI, correspondant au dédoublement de l'arbalétrier *bd*, les efforts dans les arbalétriers d'angle *c* vont en croissant régulièrement du sommet jusqu'à cette section. Depuis celle-ci jusqu'au 2ᵐᵉ étage, les efforts restent sensiblement constants.

Pour la partie moyenne comprise entre le 2ᵐᵉ étage et le 1ᵉʳ, les efforts dans la partie médiane, c'est-à-dire dans la section XXI, sont maximums pour l'arbalétrier extérieur *c* et minimums pour l'arbalétrier intérieur *a*.

A la partie inférieure, le maximum de fatigue de l'arbalétrier *c* se trouve en son milieu ; pour l'arbalétrier *a*, il se trouve à la base.

CHAPITRE V

CALCUL DES CEINTURES ET DES POUTRES TRANSVERSALES DU PREMIER ET DU DEUXIÈME ÉTAGE — POUTRES DIAGONALES SUPÉRIEURES

§ 1. — Ceintures du premier étage.

a) *Efforts de compression dus au poids propre de la Tour et au vent.* — Il résulte du calcul de l'ossature, que les grandes poutres qui réunissent les montants à chaque étage sont soumises à des efforts de compression par suite de la courbure des arbalétriers.

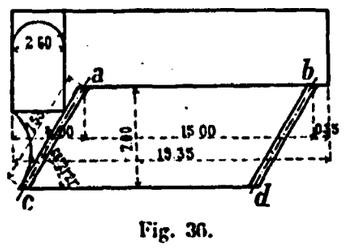


Fig. 36.

Le poids propre de la Tour produit dans la ceinture du premier étage un effort de compression qui est égal à la différence $H_2 - H_1$ des poussées horizontales de la courbe des pressions, au-dessus et au-dessous de cette ceinture. Ces poussées ont été calculées dans les tableaux pages 26 et 27. — L'effort dans la ceinture dû au poids propre est donc égal à : $C = H_2 - H_1 = 1.080.000 - 197.655 = 882.345$ k.

Nous supposerons que cet effort se répartit également entre les 4 membrures *a*, *b*, *c* et *d* des deux poutres qui réunissent les montants (fig. 36).

Le poids propre produit donc dans une membrure un effort de compression : $P = \frac{882.345}{4} = 220.586$ k.

Le vent produit dans les ceintures des faces normales à la direction du vent, des efforts qui s'obtiennent comme on a vu (page 36) en menant par le pôle du polygone des forces (Pl. XXXII, fig. 1 et 2) des parallèles aux directions des cordes de la fibre moyenne. On trouve ainsi des efforts de :

1re Hypothèse (vent de 300 k.). . . . . 294.000 kilos.
2e » (vent de 200 k. à 400 k.). . . . . 278.000 kilos.

Dans une membrure l'effort de compression maximum dû au vent est donc de : $\frac{290.000}{4} = 73.500$ kilos.

b) *Efforts de flexion dus aux charges et aux surcharges.* — La portée des poutres principales est de 35m,48 et leur écartement horizontal de 15m,00. La galerie est en porte-à-faux de 4m,00 de l'axe de la poutre extérieure.

Les charges se répartissent comme suit : *Pour la galerie par m²* : Métal, 240 k. + Plancher, 65 k. + Chéneau, 12 k. + Couverture, 30 k. + Garde-corps, 37 k. + Colonnes, 43 k. + Mâts, 6 k. + Arcades, 64 k. + Balustrades et escaliers, 13 k.; soit un total de 510 kilos.

Pour la plate-forme par m² : Métal, 240 k. + Plancher, 200 k. + Restaurants, 200 k. soit un total de 640 kil.

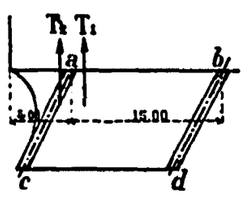


Fig. 37.

Nous admettrons de plus une surcharge de 500 k. par m². pour le poids de la foule des visiteurs. Les charges totales par mètre carré sont donc de :

510 + 500 = 1010 k. pour la galerie et 640 + 500 = 1140 k. pour la plate-forme.

Calculons les charges correspondantes par mètre courant.

La charge maxima sur la poutre extérieure *ac* (fig. 37) a lieu pour une surcharge sur la largeur totale. Le moment, pour une bande de 1 m. de largeur, dû au porte-à-faux de la galerie est de $\frac{\overline{4,0}^2 \times 1010 \text{ k.}}{2} = 8080$ m. k.

L'effort tranchant à droite de la poutre est égal à :

$$T_1 = \frac{15^m,0 \times 1140}{2} + \frac{8080}{15} = 9090 \text{ kilos.}$$

et celui de gauche $T_2 = 4 \times 1010 = 4040$ kilos.

La charge totale par mètre courant de la poutre extérieure *ac* est de 9090 k. + 4040 k. = 13.130 kilos.

La charge maxima sur la poutre intérieure a lieu quand le porte-à-faux n'a pas de surcharge.

On a par mètre de largeur :

Moment dû au porte-à-faux . . . . . $\frac{\overrightarrow{4,0} \times 510}{2} = 4080$ m. k.

Effort tranchant à gauche de la poutre *bd* : $\frac{15,0 \times 1140}{2} - \frac{4080}{15} = 8272$ k.

« droite « $0,35 \times 1140 = 399$ k.

Charge verticale par mètre courant de la poutre extérieure *bd* = 8671 soit 8700 kilos.

Les efforts verticaux par mètre courant ainsi obtenus sont encore à décomposer suivant l'inclinaison des poutres et suivant une horizontale (fig. 38).

$\alpha_1 = 68°21'27''$ étant l'inclinaison des poutres *ac* et *bd*, on a :

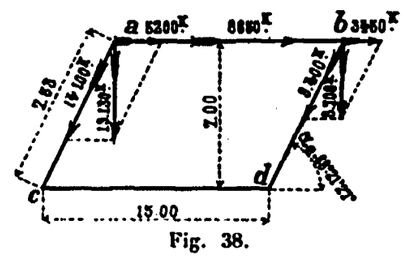


Fig. 38.

Effort par mètre courant dans la poutre extérieure *ac* : $p' = \frac{13.130}{\sin \alpha_1} = 14.100$ k.

« « intérieure *bd* : $p'' = \frac{8.700}{\sin \alpha_1} = 9.400$ k.

Composante horizontale de 13.130 k. $= \frac{13.130}{\operatorname{tg} \alpha_1} = 5.200$ k.

« « 8.700 k. $= \frac{8.700}{\operatorname{tg} \alpha'} = 3.450$ k.

Effort par mètre courant dans la poutre *ab* = 8.650 kilos.

Les moments fléchissants maximums au milieu de la travée ont pour valeur :

Moment de la poutre (*a*) $\frac{14.100 \text{ k.} \times \overrightarrow{35,48}}{8} = 2.218.690.$

— (*bd*) $\frac{9.400 \text{ k.} \times \overrightarrow{35,48}}{8} = 1.479.130.$

— (*ab*) $\frac{8.650 \text{ k.} \times \overrightarrow{35,48}}{8} = 1.361.110.$

Connaissant les moments maximums, il suffit, pour avoir les efforts qu'ils engendrent dans les membrures, de diviser ces moments par l'écartement des membrures. Pour les poutres (*ac*) et (*bd*), cet écartement est de $7^m,40$ et pour la poutre (*ab*) de $15^m,00$.

Nous supposerons positifs les efforts de compression et négatifs les efforts de tension. On a :

Efforts dans les membrures *a* et *c* dus à la flexion de la poutre (*ac*)

$$A_1 = \frac{2.218.690}{7,40} = +299.823 \qquad C_1 = \frac{2.218.690}{7,40} = -299.823.$$

Efforts dans les membrures *b* et *d* dus à la flexion de la poutre (*bd*)

$$B_1 = \frac{1.479.130}{7,40} = +199.882 \qquad D_1 = \frac{1.479.130}{7,40} = -199.882.$$

Efforts dans les membrures *a* et *b* dus à la flexion de la poutre (*ab*)

$$A_2 = \frac{1.361.110}{15,00} = +90.740 \qquad B_2 = \frac{1.361.110}{15,00} = -90.740$$

c) *Efforts totaux maximums dans les membrures et coefficients de travail.* — Nous avons vu plus haut que le poids propre de la Tour produit dans chaque membrure des efforts de compression : P = 220.586 k.

Nous ne tiendrons pas compte de l'effort de compression de 73.500 k. dû au vent de 300 k. par mètre carré, parce qu'on ne peut pas admettre de surcharge sur le plancher par un vent de cette intensité.

L'effort maximum total dans la membrure (*a*) est donc de

$$A = A_1 + A_2 + P = 299.823 + 90.740 + 220.586 = 611.149$$

et dans la membrure *b*

$$B = B_1 + B_2 + P = 199.882 - 90.740 + 220.586 = 329.728.$$

Pour les membrures inférieures *c* et *d* qui travaillent à la tension, nous négligerons la compression P qu'il faudrait soustraire des efforts C_1 et D_1.

On a donc dans la membrure *c* un effort de 299.83 k. et dans la membrure *d*, un effort de 199.882 kilos.

Nous donnons ci-dessous la section de chaque membrure au milieu de la travée et leur coefficient de travail maximum.

Membrure *a*.

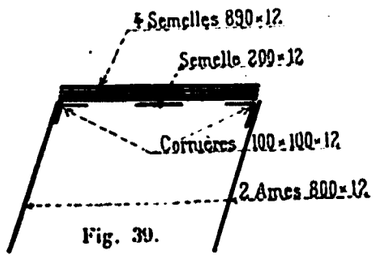


Fig. 39.

		m/m².
2 âmes.....	800 × 12 =	19 200
2 cornières...	100 × 100 × 12 =	4.512
4 semelles...	890 × 12 =	42.720
Semelle.....	200 × 12 =	2 400
		68.832

Coefficient de travail $\frac{611.149}{68.832} = 8^k,9$

Membrure *b*.

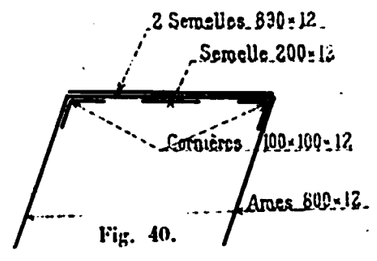


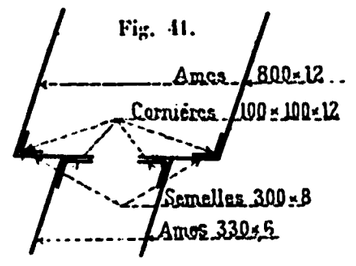
Fig. 40.

		m/m².
2 âmes.....	800 × 12 =	19.200
2 cornières...	100 × 100 × 12 =	4.512
2 semelles...	890 × 12 =	21.360
Semelle....	200 × 12 =	2.400
		47.472

Coefficient de travail $\frac{329.728}{47.472} = 6^k,9$

Membrures *c* et *d*.

Fig. 41.



		m/m².
2 âmes.....	800 × 12 =	19.200
4 cornières...	100 × 100 × 12 =	9.024
2 semelles...	300 × 8 =	4.800
2 âmes.....	330 × 6 =	3.960
		36.984

Coefficient de travail *c* : $\frac{299.823}{36.984} = 8^k,1$

— *d* : $\frac{199.882}{36.984} = 5^k,4$

d) *Efforts dans les barres de treillis.* — Les efforts tranchants maximums aux points d'attache des poutres sur les montants ont pour valeur :

Effort tranchant maximum de la poutre *ac* : $T_{ac} = \frac{14.100\,\text{k.} \times 35,48}{2} = 250.134\,\text{k.}$

— — — *bd* : $T_{bd} = \frac{9.400\,\text{k.} \times 35,48}{2} = 166.756\,\text{k.}$

— — — *ab* : $T_{ab} = \frac{8.650\,\text{k.} \times 32,70}{2} = 141.147$ kilos.

A l'aide de ces valeurs, nous avons tracé sur l'épure les lignes représentatives des efforts tranchants maximums totaux (Voir Pl. XXXIV).

Ces efforts, projetés suivant la direction des barres, donnent la ligne des efforts totaux suivant les barres.

Dans les tableaux de cette même planche, nous donnons pour chaque type de barre les efforts totaux, les efforts par barre, leur section et leur coefficient de travail maximum.

§ 2. — Poutres transversales du premier étage.

Les figures 42 et 43 représentent les poutres transversales qui s'appuient sur les ceintures et qui supportent les solives sur lesquelles est établi le plancher des restaurants.

Les poutres transversales *a* sont les plus chargées et supportent en plus que les poutres *b*, le plancher et les cloisons des sous-sols.

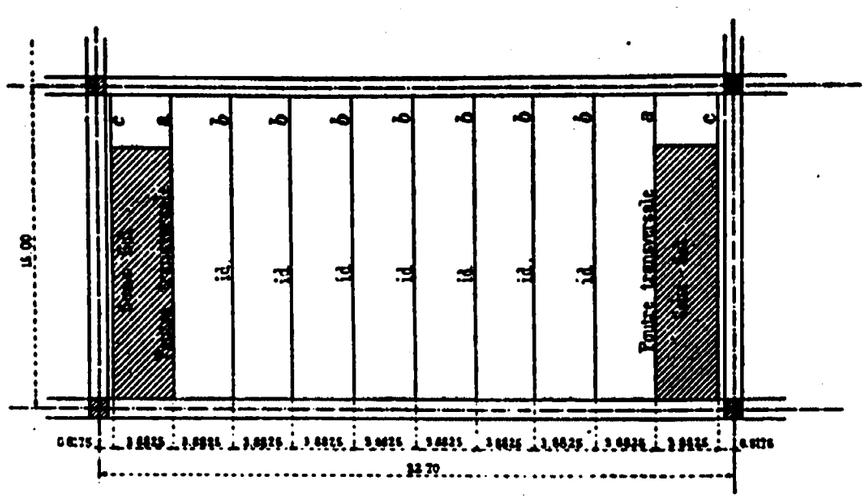


Fig. 42.

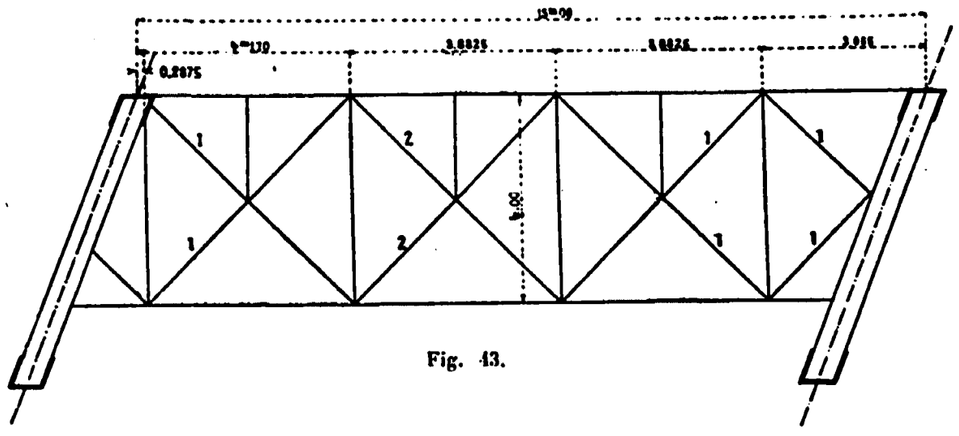


Fig. 43.

a) *Détermination des charges.* — La charge de ces poutres par mètre courant se décompose comme suit :

		Poutre *a*.	Poutre *b*.
Plancher supérieur	200 k. × 3,88 m.	776 k.	776 k.
Surcharge du plancher supérieur	500 k. × 3,88 m.	1940	1940
Plancher du sous-sol	200 k. × $\frac{3,88\text{ m.}}{2}$	388	»
Surcharge dans le sous-sol	400 k. × $\frac{3,88\text{ m.}}{2}$	776	»
Parois des sous-sols	50 k. × 4,00 m.	200	»
Asphalte	21 k. × $\frac{3,88\text{ m.}}{2}$	47	47
Restaurant		1000	1000
Poids propre de la poutre		133	133
Totaux		5260 k.	3896 k.

b) *Membrures.* — Le moment fléchissant maximum correspondant au milieu de la poutre est égal à :

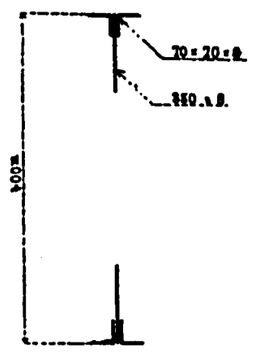


Fig 44.

$$M = \frac{5.260\text{ k.} \times \overline{15,00}^2}{8} = 147.937\text{ m. kg. pour les poutres } a$$

et

$$M = \frac{3.896\text{ k.} \times \overline{15,00}^2}{8} = 109.575\text{ m. kg.} \quad \text{« } \quad b$$

Les poutres *a* et *b* ont la même section figurée ci-contre ; le moment d'inertie est égal à :

$$I = \begin{cases} \text{Ame } 350 \times 8 = 0,018\,709 \\ \text{Corn. } 70 \times 70 \times 8 = 0,016\,554 \end{cases}$$

$$I = 0,035\,263$$

$\frac{I}{v} = \frac{0,035\,263}{2,00} = 0,017\,631$ et le coefficient de travail maximum au milieu de la poutre a pour valeur :

$$R = \frac{147.937}{17.631} = 8^k,4 \text{ par mm}^2 \text{ pour la poutre } a$$

et

$$R = \frac{109.675}{17.631} = 6^k,2 \quad \text{« } \quad \text{« } \quad b$$

c) ***Treillis.*** — L'effort tranchant maximum au droit des grandes poutres formant la ceinture du premier étage, est égal à :

$$T = \frac{5.260\,k. \times 15{,}00\,m.}{2} = 39.450\,k. \text{ pour les poutres } a$$

$$T = \frac{3.896\,k. \times 15{,}00\,m.}{2} = 29.220\,k. \quad « \quad b$$

Ces efforts projetés suivant la direction des barres de treillis, dont l'inclinaison est d'environ 45°, deviennent : $P = 39.450\,k. \times 1{,}414 = 55.780\,k.$ pour les poutres *a*.

$P = 29.220\,k. \times 1{,}414 = 41.720\,k.$ « *b*.

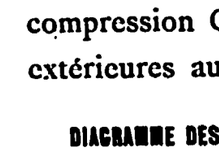


Fig. 45.

L'effort dans une barre sera de : $\frac{P}{2} = \frac{55.780\,k.}{2} = 27.890\,k.$ pour les poutres *a*.

$\frac{P}{2} = \frac{41.720\,k.}{2} = 20.860\,k.$ « *b*.

La section des barres N° 1, dans les panneaux voisins des grandes poutres ceintures, est figurée ci-contre (fig. 45). La surface de cette section comprend :

Ame 150×10	$= 1.500\,mm^2$
2 Cornières $80 \times 80 \times 9$	$= 2.718$
Total. . . .	$4.218\,mm^2$

Fig. 46.

Le coefficient de travail correspondant est de : $R = \frac{27.890}{4.218} = 6^k,5$ pour la poutre *a*.

$R = \frac{20.860}{4.218} = 4^k,9$ « *b*.

Dans le panneau central, où les efforts tranchants sont relativement très faibles, les barres N° 2 ont la section ci-contre, fig. 46.

§ 3. — Ceintures du second étage.

a) *Efforts de compression dus au poids propre de la Tour et au vent, dans les poutres* A *et* C. — Nous avons vu dans le calcul de l'ossature que le poids propre produit dans la ceinture du second étage un effort de compression C_1 qui est égal à $C_1 = H_1 - C_2$ (pl. XXXII fig. 1 et 2), H_1 et C_2 étant les composantes des forces extérieures au-dessous et au-dessus de la ceinture.

DIAGRAMME DES POUTRES DU SECOND ÉTAGE.
Fig. 47.

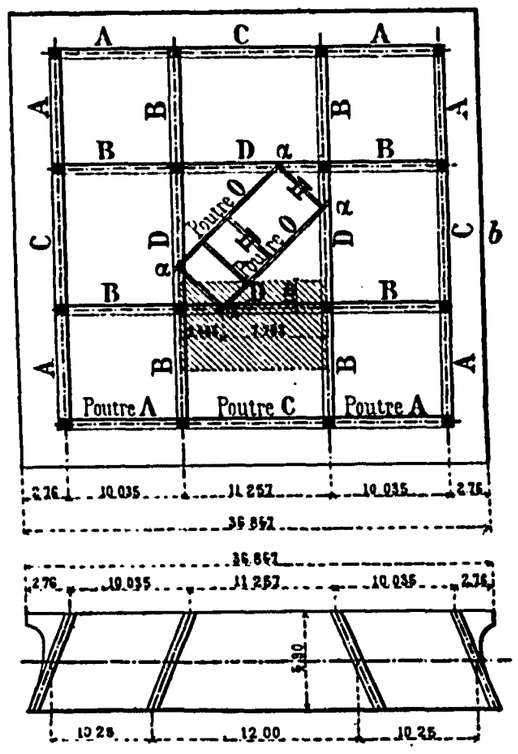


Fig. 48.

La composante H_1 a été calculée dans le tableau page 26, et trouvée égale à : $H_1 = 197.655$ kilos.

La force C_2 a été déterminée sur l'épure (pl. XXXII, fig. 6) en décomposant le quart du poids de la Tour qui se trouve au-dessus de la ceinture, suivant la direction des arbalétriers du panneau 12 et suivant une horizontale.

On trouve $C_2 = 53.000$ kilos, d'où $C_1 = 197.655 - 53.000 = 144.655$ k.

En admettant que cet effort se répartit également entre les 4 membrures des deux poutres du plancher (fig. 48), on a par membrure un effort de compression : $P = \frac{144.655}{4} = 36.200$ k.

Les efforts que le vent produit dans les ceintures des faces normales à sa direction, s'obtiennent, comme pour la ceinture du premier étage, dans les figures de la planche XXXIV.

On trouve des efforts de :

1re	hypothèse (vent de 300 k.)	102.500 k
2e	« (vent de 200 k. à 400 k.).	101.000 k

Dans une membrure, l'effort maximum dû au vent est donc de $\frac{102.500\,k.}{4} = 25.625$ k

b) *Efforts de flexion dus aux charges et aux surcharges.* — Les poutres principales qui réunissent les

montants sont les poutres A, B, C, D, du diagramme ci-contre (fig. 47 et 48) dont les portées sont de :

Poutres A et B. 10m,25

« C et D. 12m,00

La galerie est en porte-à-faux de 2m,76 par rapport à l'axe des poutres extérieures A et C.

Les charges uniformément réparties que nous admettrons pour le calcul de ces poutres, sont les suivantes :

Pour la galerie : par mètre carré, Métal, 300 k. + Couverture, 30 k. + Mâts, 4 k. + Plancher, 60 k. + Chéneau, 7 k. + Garde-corps, 5 k. + Divers, 14 k. Soit un total de 420 kilos.

Pour la plate-forme : Métal, 300 k. + Plancher, 200 k. + Installations diverses, Tuyaux, Machines, etc., 100 k. Soit un total de 600 kilos.

En plus la poutre D supporte, par l'intermédiaire de la poutre O, une partie du poids des montants de l'ascenseur Édoux.

La surcharge admise étant de 500 kilos par m², les charges totales sont de :

420 + 500 = 920 k. par mètre carré pour la galerie.

600 + 500 = 1.100 k. « « plateforme.

Les charges correspondantes, par mètre courant de poutre, sont de $920\text{ k.} \times 2^{m},76 + 1.100\text{ k.} \times \frac{10,075}{2} = 8.060\text{ k.}$

Comme les faces des montants dans le plan desquelles se trouvent les poutres A et C sont presque verticales, on ne commet aucune erreur sensible en supposant que cette charge agit dans le plan des poutres.

Les moments maximums au milieu de la travée ont pour valeur :

Pour la poutre A. . . . . $M_A = \frac{8.060 \times \overline{10,25}^2}{8} = 105.850\text{ m. k}$

« C. . . . . $M_C = \frac{8.060 \times \overline{12,00}^2}{8} = 145.080\text{ m. k}$

En divisant ces moments par la hauteur des poutres, qui est de 4m,90, on obtient les efforts correspondants dans les membrures. On trouve :

Pour la poutre A, un effort de $A_1 = \frac{105.850}{4,9} = 21.600\text{ k.}$

« C, « $C_1 = \frac{145.080}{4,9} = 29.600\text{ k.}$

c) *Efforts totaux maximums dans les membrures et coefficients de travail des poutres* A *et* C. — Les efforts maximums totaux dans les membrures ont donc pour valeur :

Poutre A. . . . . $A = A_1 + P = 21.600\text{ k.} + 36.200\text{ k.} = 57.800\text{ k.}$

« C. . . . . $C = C_1 + P = 29.600\text{ k.} + 36.200\text{ k.} = 65.800\text{ k.}$

Poutre A.

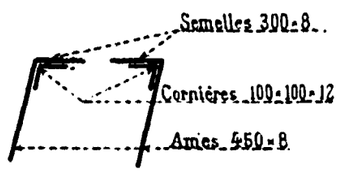


Fig 49.

Section des membrures. . . . . 16.512 m/m²

Coefficient de travail $\frac{57.800}{16.512} = 3^{k},5$

Poutre C.

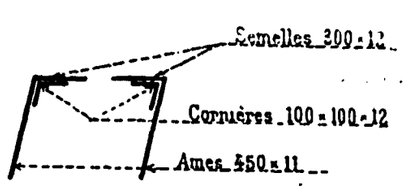


Fig. 50.

Section des membrures. . . . . 21.612 m/m²

Coefficient de travail $\frac{65.800}{21.612} = 3^{k},05$

d) *Efforts dans les barres de treillis.* — Les efforts tranchants maximums aux points d'attache des poutres sur les arbalétriers, ont pour valeur :

Poutre A. . . . . $T_A = \frac{8.060\text{ k.} \times 10^{m},25}{2} = 41.310\text{ k.}$

— C. . . . . $T_C = \frac{8.060\text{ k.} \times 12^{m},00}{2} = 48.360\text{ k.}$

L'angle d'inclinaison des barres étant de 55°50' (fig. 51), l'effort correspondant suivant la direction des barres est de :

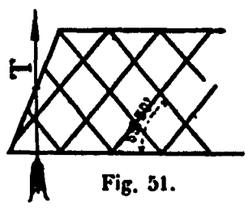


Fig. 51.

Poutre A. . . . . $E_A = \frac{41.310 \text{ k.}}{\sin 55°50'} = 50.000 \text{ k.}$

— C. . . . . $E_C = \frac{48.360 \text{ k.}}{\sin 55°50'} = 58.400 \text{ k.}$

Nous donnons, dans le tableau suivant, les efforts dans les barres de ces poutres, leur composition et leur coefficient de travail maximum.

DÉSIGNATION DE LA POUTRE.	EFFORT TOTAL SUIVANT LES BARRES.	NOMBRE DE BARRES INTÉRESSÉES.	EFFORT PAR BARRE.	COMPOSITION DES BARRES.	SURFACE DE LA SECTION.	COEFFICIENT DE TRAVAIL.
Poutre A.....	50.000k	4	12 500k	⊨⊨ 4 cornières 80×80×8	4.864	2k,50
Poutre C.....	58.400k	4	14.600k	Id.	4.864	3k,00

La poutre B a la même portée et les mêmes sections que la poutre A; mais les charges qu'elle supporte sont beaucoup moindres; il n'y a donc pas lieu de calculer sa résistance.

§ 4. — Poutres transversales D. — Portée 12,00 m.

Nous admettrons que la surface qui charge uniformément la poutre D et qui est indiquée par des hachures sur le diagramme figure 47, a une largeur constante de :

$$\frac{10^m,035}{2} + 1^m,983 = 7^m.$$

La charge uniformément répartie par mètre courant de poutre est donc égale à

$$p = 1.100 \text{ k.} \times 7,00 = 7.700 \text{ k.}$$

Le moment fléchissant correspondant au milieu de la poutre a pour valeur

$$M_1 = \frac{7.700 \times \overline{12}^2}{8} = 138.600 \text{ m. k.}$$

Déterminons maintenant la réaction de la poutre O qui agit aux points α.

Nous supposerons que la moitié du poids des montants de l'ascenseur Édoux est portée par les poutres de la deuxième plate-forme et l'autre moitié, par celles du plancher intermédiaire.

Le poids de ces montants par mètre courant est de :

Montant central, 230 k., + Montant latéral, 170 k., + 2 Colonnes guides en fonte, 480 k., + 2 Tuyaux, 200 k. (eau comprise) + Brides, boulons, divers, 60 k.; soit un total de 1.140 kilos.

Le poids total des montants compris entre les deux planchers est de $1.140 \times 80 = 91.200$ k.

La réaction correspondante transmise aux quatre points d'appui α des poutres O a donc pour valeur

$$R_1 = \frac{91.200}{2 \times 4} = 11.400 \text{ k.}$$

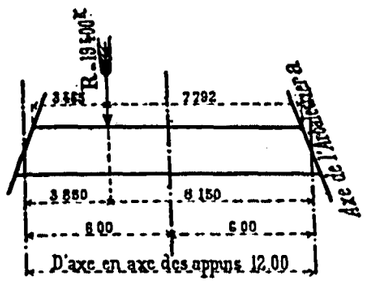


Fig. 52.

De plus on a : { Réaction provenant de l'escalier. . . $R_2 = 5.000$; Surcharge sur la poutre O, etc. . . $R_3 = 3.000$

Réaction totale. . . . . $R = 19.400 \text{ k.}$

Le moment correspondant au milieu de la travée est égal à

$$M_2 = \frac{19.400 \times 3,85 \times 6,00}{12} = 37.340 \text{ m. k.}$$

Le moment total. . . . . $M = M_1 + M_2 = 138.600 + 37.340 = 175.940$

L'effort correspondant dans une membrure, $D_1 = \frac{175.940}{4,9} = 35,900$ k.

« total dans une membrure, $D = D_1 + P = 72.100$ k.

Les membrures ont la même composition que dans les poutres C. Leur section est de 21.612 m/m². Le coefficient de travail est donc de $\frac{72.100}{21.612} = 3^k,30$.

L'effort tranchant dû à la charge uniforme est égal à $T_1 = \frac{7.700 \times 12}{2}$ 46.200

Celui dû à la réaction R, $T_2 = \frac{19.400 \times 8,15}{12}$ 13.175

L'effort tranchant maximum total de gauche est de. . . . . 59.375 k.

L'effort résultant suivant les barres de treillis est de $\frac{59.375 \text{ k.}}{\sin 55°50'} = 72.000$ k., ce qui donne par barre $\frac{72.000}{4} = 18.000$ k.

Barres comprimées.

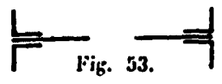


Fig. 53.

4 cornières. . . . . 80 × 80 × 10
2 âmes. . . . . 150 × 10

Surface 9.000 m/m².

Coefficient de travail $\frac{18.000}{9} = 2$ kilos.

Barres tendues.

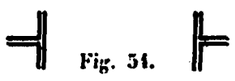


Fig. 54.

4 cornières.. 80 × 80 × 10 = 6.000 m/m²
2 semelles... 160 × 9 = 2.880

Surface = 8.880 m/m².

Coefficient de travail $\frac{18.000}{8.880} = 2$ kilos.

§ 5. — Poutres diagonales supérieures.

Nous ferons remarquer de suite que, pour le calcul de ces poutres, nous n'avons pas à tenir compte des contre-fiches qui servent d'entretoisement et résistent, comme on le verra plus loin, aux efforts horizontaux du vent dans la partie supérieure de la Tour.

La poutre diagonale D, qui supporte les poulies de l'ascenseur Édoux est continue; l'autre poutre diagonale D' est interrompue à sa rencontre avec la poutre D, sur laquelle elle s'attache au milieu de sa portée. Néanmoins sa continuité est assurée par le moyen de goussets supérieurs et inférieurs, qui établissent la liaison entre les membrures interrompues (fig. 55).

Nous ne ferons que le calcul de la poutre diagonale D, en ne tenant pas compte de cette continuité. Nous nous plaçons ainsi dans des conditions désavantageuses; car il est clair que la poutre D' transmettra aux arbalétriers C_2 et C_4 une partie des charges que supportent ces deux poutres.

Nous donnons, dans le tableau suivant, les différentes charges qui agissent sur la poutre diagonale D aux points A, B et C d'attache des poulies de l'ascenseur.

a) *Détermination des charges.*

DÉSIGNATION DES CHARGES.	CHARGES AUX POINTS A	B	C	OBSERVATIONS.
Cabines pleines	5.000 k.	10.000 k.	5.000 k.	
Pistons et câbles	7.000	14.000	7.000	16.000 k. de pistons et 12.000 k. de câbles.
Poulies	2.000	2.000	2.000	
Escalier supérieur	—	2.400	—	8 m. à 300 k. par mètre.
Phare et lanterne	—	10.000	—	
Plate-forme supérieure avec surcharge	—	7.500	—	25 m² à 300 k. par m².
Suspension du plancher du pavillon supérieur réservé et de sa surcharge	6.000	6.000	6.000	
	$P_A = 20.000$ k.	$P_B = 51.000$ k.	$P_C = 20.000$ k.	

Dans les poids ci-dessus, nous n'avons compté aucune charge provenant des guides de l'ascenseur

Édoux, parce que ces montants, qui s'arrêtent dans la poutre D, à laquelle ils sont fixés, sont supposés être portés en partie par les poutres de la troisième plate-forme et en partie par celles du plancher intermédiaire.

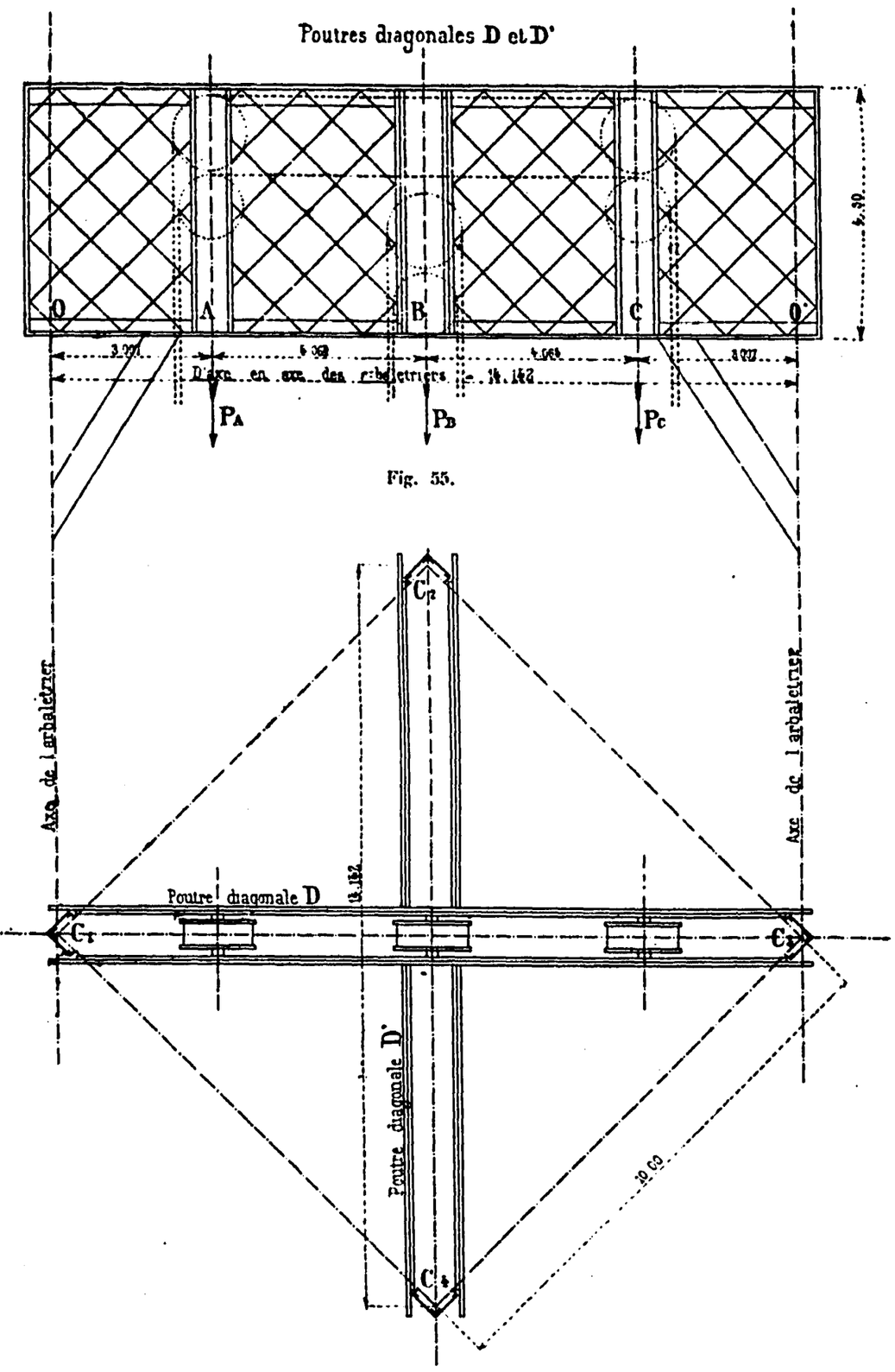


Fig. 55.

Fig. 56.

La poutre D supporte en outre une charge par mètre courant, composée comme suit :

Toiture du pavillon supérieur réservé.	150 k.
Poids propre de la poutre.	750 k.
Total.	900 k.

b) *Membrures.* — Le moment maximum au milieu de la poutre, dû aux charges concentrées en A, B, et C est égal à :

$$M_1 = 45.950 \times 7{,}071 - 20.000 \times 4{,}064 = 243.630 \text{ m. k.}$$

Le moment maximum dû à la charge uniforme de 900 kilos par mètre courant, a pour valeur :

$$M_2 = \frac{900\,k. \times \overline{14,142}^2}{8} = 22.500\ m.\ k.$$

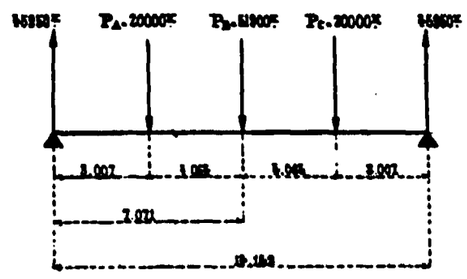


Fig. 57.

Le moment maximum total est donc :

$$M = M_1 + M_2 = 243.630 + 22.500 = 266.130\ m.\ k.$$

La section de la poutre, qui est constante, est figurée ci-dessous (fig. 58).
Son moment d'inertie est :

$$I = 0,207.945, \qquad \text{et} \qquad \frac{I}{v} = \frac{0,207.945}{2,26} = 0,092011.$$

Le coefficient de travail maximum des membrures de la poutre D est donc égal à $\frac{266.130}{0,092011} = 2^k,9$.

c) *Treillis.* — L'effort tranchant de la poutre D à son point d'attache O sur l'arbalétrier (voir fig. 55) est

$$T_0 = 45.950 + \frac{1}{2}(900 \times 14,142) = 52.314\ k.$$

L'effort tranchant maximum de la partie centrale AB, où les barres de treillis ont des dimensions plus faibles, a lieu au point A. Il est égal à

$$T_A = 52.314 - 20.000 - 900 \times 3,007 = 29.608\ k.$$

α étant l'angle d'inclinaison des barres de treillis, l'effort total suivant la direction des barres est $P = \frac{T}{\sin \alpha}$, expression dans laquelle $\sin \alpha = 0,68$, l'angle α étant de 43° environ.

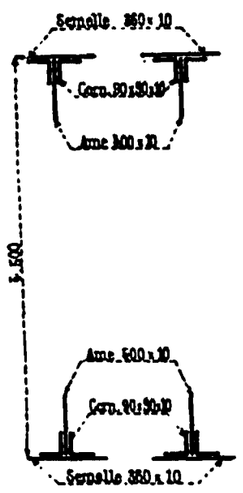


Fig. 58.

Les efforts suivant les barres seront donc :

En O : 76.930 k., et en A : 43.540 k.

Le treillis de la poutre est multiple et le nombre de barres qui résistent à cet effort étant de 8, l'effort par barre sera $\frac{P}{8}$, soit en O, 9.616 k. et en A, 5.442 k.

Dans les parties extrêmes de la poutre, les barres de treillis sont constituées par quatre cornières de $70 \times 70 \times 8$ donnant une section totale de 4.224 mm²; dans la partie centrale, ce sont quatre cornières de $60 \times 60 \times 7$, et leur section totale est de 3.164 mm². Les coefficients de travail correspondants sont respectivement de $2^k,3$ et $1^k,7$.

Dans les barres comprimées, les cornières des treillis des deux parois de la poutre sont réunies entre elles par un treillis en fer plat, ce qui donne à ces barres une résistance suffisante au flambage.

Nous avons intentionnellement fait travailler ces poutres à des coefficients peu élevés, pour leur permettre de mieux résister aux chocs qui pourraient se produire sur les poulies, dans le cas de l'arrêt brusque d'une cabine et d'une tension subite des câbles.

d) *Contre-fiches.* — Par suite de l'absence de barres de treillis reliant les arbalétriers au-dessus de la 3ᵐᵉ plate-forme, ce sont les contre-fiches γ_1, γ_2, γ_3 et γ_4 sous les poutres diagonales D et D', qui résistent aux efforts tranchants produits par le vent dans la partie de la Tour comprise entre les poutres diagonales et le plancher de la 3ᵐᵉ plate-forme (fig. 60).

Les surfaces offertes au vent, pour un vent normal à une face de la Tour au-dessus de la troisième plate-forme, sont données en détail dans le calcul de la surface de l'élément O (panneau 29 et campanile, voir Appendice). La surface totale est donc de :

$$S = 20,4 + 2,3 + 31,8 + 49,5 + 25 = 129\ m^2.$$

L'effort correspondant, pour un vent de 400 k. par mètre carré, est égal à :

$$P = 129 \times 400 = 51.600\ k.$$

Nous supposerons que cet effort se répartit également entre les quatre contre-fiches γ_1, γ_2, γ_3 et γ_4. On a donc en chacun des points C_1, C_2, C_3, et C_4 (fig. 60) un effort $\frac{P}{4}$.

Ces efforts agissent dans les faces C_1C_2, et C_4C_3, parallèles à la direction du vent. Comme les contre-fiches sont dirigées suivant les diagonales C_1C_3 et C_4C_2, chacun de ces efforts $\frac{P}{4}$ se décompose, comme l'indique la figure 60, en une force T dirigée suivant la diagonale et en un effort S normal à la direction du vent. Les efforts S s'annulent et l'effort tranchant T auquel résiste chacune des contre-fiches est égal à :

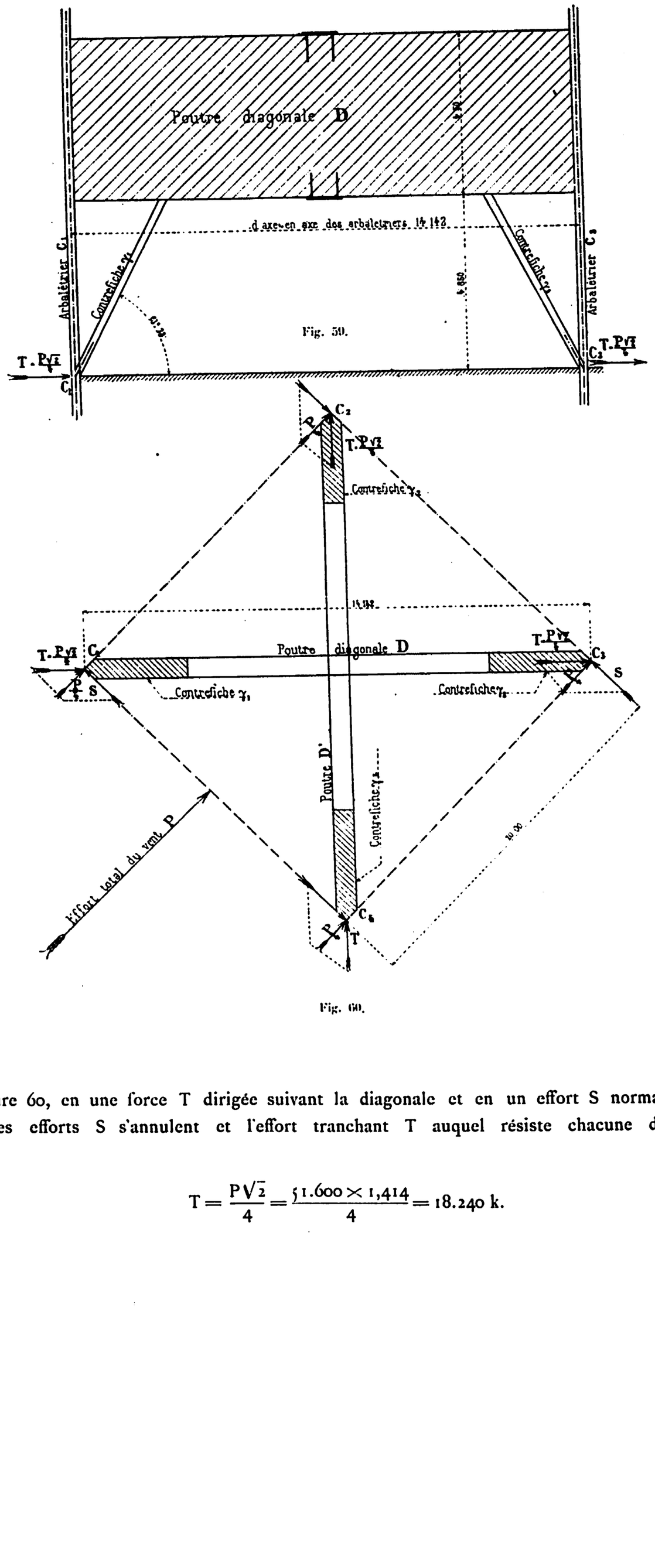


Fig. 60.

$$T = \frac{P\sqrt{2}}{4} = \frac{51.600 \times 1{,}414}{4} = 18.240 \text{ k.}$$

Pour avoir l'effort correspondant Q dans la contre-fiche, il suffit de décomposer cet effort T suivant une verticale et suivant une force Q parallèle à la contre-fiche.

$\alpha = 61°23'$ étant l'angle d'inclinaison de la contre-fiche, l'effort Q sera égal à :

$$Q = \frac{T}{\cos \alpha} = \frac{18.240}{0{,}479} = 38.080 \text{ k.}$$

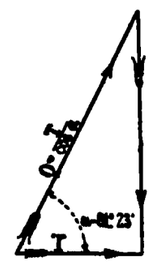


Fig. 61.

La section d'une contre-fiche est figurée ci-contre. On a pour la surface de cette section :

2 âmes $600 \times 8 =$	9.600 mm².
4 corn. $70 \times 70 \times 8 =$	4.224
Total.	13.824 mm².

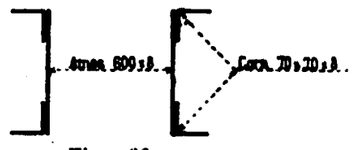


Fig. 62.

Le coefficient de travail est $R = \frac{38.080}{13.824} = 2^k,75$.

Deux des contre-fiches travaillent à la compression et les deux autres à la tension. Si l'on n'admettait pour les contre-fiches qu'un travail de compression (à cause de leur attache sur les poutres diagonales où, en cas de tension, il se produirait un travail d'arrachement dans les rivets), le coefficient de travail serait $R' = 2 \times 2{,}75 = 5^k,5$.

CHAPITRE VI

CALCUL DES POUTRES DES PLANCHERS DU TROISIÈME ÉTAGE ET DE LA PLATE-FORME INTERMÉDIAIRE. — POUTRES D'ASCENSEURS.

§ 1. — Plancher du troisième étage.

a) *Détermination des charges.* — Les charges que supporte ce plancher sont les suivantes :

a) Le poids propre des poutres;

b) Une charge uniformément répartie qui, par mètre carré, se décompose comme suit :

Plancher.....	50 k.	par mètre carré.
Fer I du plancher.....	20	»
Surcharge.....	500	»
Total.....	570 k.	

c) Un certain nombre de charges concentrées aux points α, β, γ et δ.

1° Au centre α du plancher : une charge provenant du poteau A et de la colonne guide du piston de l'ascenseur Edoux.

Nous supposerons que la poutre A porte la moitié de la longueur de ce poteau comprise entre la troisième plate-forme et le plancher intermédiaire; soit une longueur de :

$$\frac{80{,}2\,m.}{2} + 4{,}80\,m. = 44{,}90\,m.$$

Son poids par mètre courant est de :

Pour le poteau A.....	230 k.
» la colonne guide.....	200
Total.....	430 k.

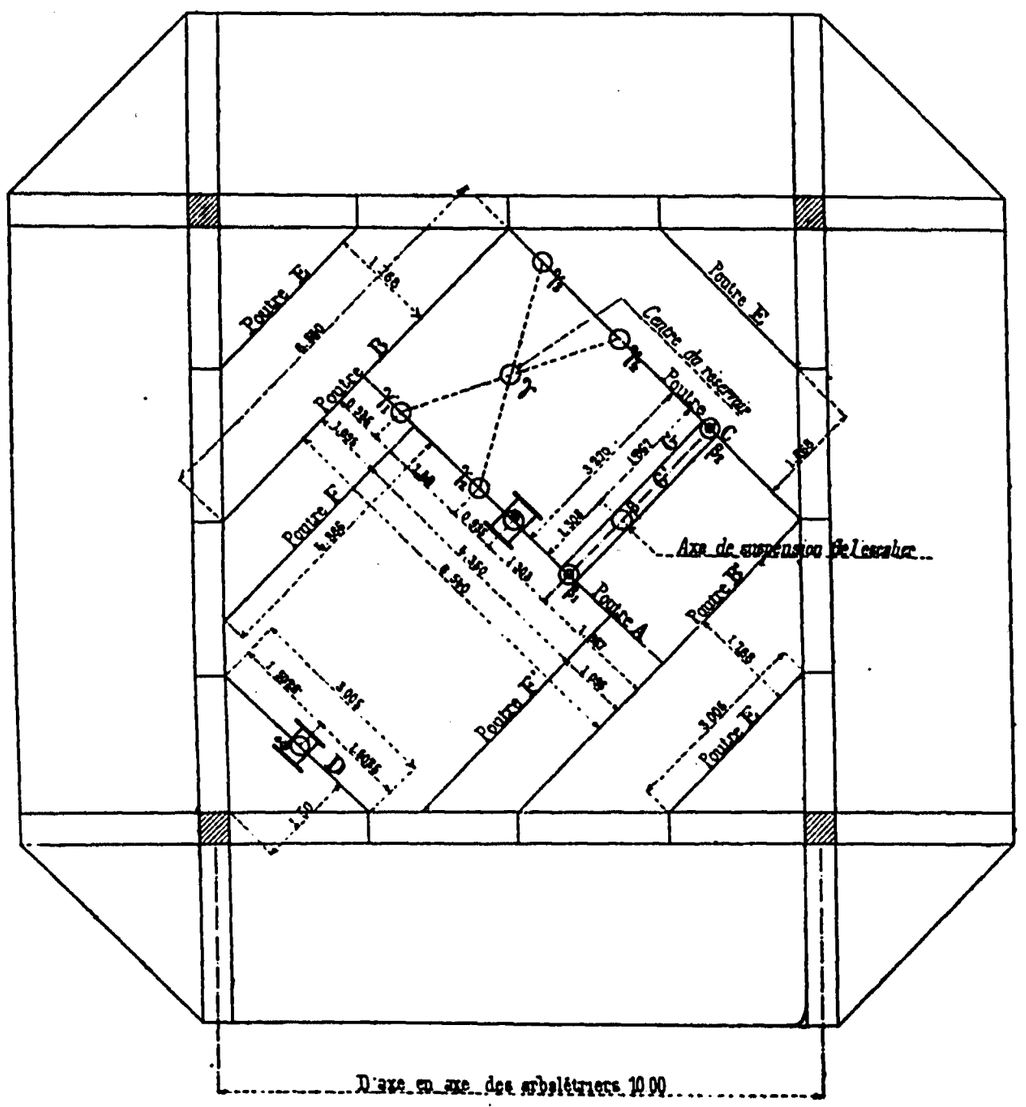


Fig. 63. — Diagramme du plancher du 3ᵐᵉ étage.

La charge concentrée au point a est donc :

$$P_a = 44{,}9 \times 430\,kg = 19.310\,kg$$

2° Au point β, on a la charge provenant de la suspension de l'escalier.

La longueur de cet escalier qui est supporté par les poutres de la troisième plate-forme est de 25,00 *m*.

Son poids par mètre courant peut se décomposer comme suit :

Poids propre de l'escalier.....	200 *kg*
Surcharge.....	200
Total.....	400 *kg*

La charge en β due à l'escalier est donc égale à :

$$P_\beta = 25 \times 400 = 10.000\,kg$$

Cette charge est transmise par l'intermédiaire des poutrelles G et G' aux poutres A et C. Elle produit en β_1 sur la poutre A un effort $P_{\beta_1} = \frac{10.000 \times 1{,}967}{3{,}27}$

$$P_{\beta_1} = 6.015\,kg, \text{ soit } 6.000\,kg$$

et en β_2, sur la poutre C, un effort

$$P_{\beta_2} = \frac{10.000 \times 1{,}303}{3{,}27}$$

$$P_{\beta_2} = 3.985\,kg, \text{ soit } 4.000\,kg$$

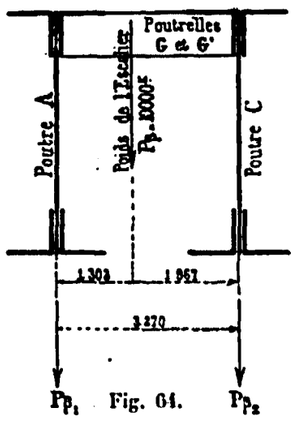


Fig. 64.

3° Une charge provenant du réservoir qui est suspendu aux poutres A et C du plancher. Le poids du réservoir plein d'eau est de 25.000 *kg*. Ce poids, qui agit en γ, se répartit également entre les quatre montants de suspension γ_1, γ_2, γ_3 et γ_4 des poutres A et C et donne pour chacun d'eux une charge de $\frac{25.000\,kg}{4} = 6.250\,kg$, plus une charge de 750 *kg* pour la suspension du réservoir et de la passerelle de visite.

La charge en γ_1, γ_2, γ_3 et γ_4 sera donc de :

$$P_{\gamma_1} = P_{\gamma_2} = P_{\gamma_3} = P_{\gamma_4} = 6.250 + 750 = 7.000\,kg$$

4° Une charge en δ, provenant du poteau-guide de l'ascenseur Edoux, porté par la poutre D. Le poids total par mètre courant de ce poteau est de :

Poteau proprement dit..... ..	170 *kg*
Colonne-guide du piston.....	200
Tuyaux (eau comprise).....	100
Total.....	470 *kg*

La longueur du poteau, que nous supposerons porté par les poutres de la troisième plate-forme, sera la même que pour le poteau central, soit 44,9 *m*.

La charge en δ, qui agit sur la poutre D, est donc de :

$$P_\delta = 470 \times 44{,}940 = 21.100\,kg$$

b) *Poutre* A. — Portée = 6,54 *m*.

Son poids propre par mètre courant est de.....	400 *kg*
La charge par mètre courant due à la partie rectangulaire du plancher comprise entre les poutres A, C, B et B', ainsi qu'à la surcharge est de..... $\frac{3{,}270 \times 570\,kg}{2}$	= 930 *kg*
Charge totale par mètre courant..... ...	1.330 *kg*

Le moment maximum correspondant est égal à :

$$M_1 = \frac{1.330 \times \overline{6{,}54}^2}{8} = 7.110$$

En dehors des charges concentrées P_a, P_{β_1}, P_{γ_1} et P_{γ_2} dues au poteau A, à l'escalier et au réservoir, et que nous avons calculées plus haut, la poutre A supporte encore la réaction de la poutre F. Le poids de la poutre F par mètre courant est de :

Poids propre..... ..	60 *kg*
Plancher et surcharge.....	$\frac{570 \times 1{,}095}{2} = 310$
Paroi vitrée.....	50
Total.....	420 *kg*

La portée de la poutre F étant de 4,366 *m*, sa réaction sur la poutre A sera de :

$$P_f = \frac{420 \times 4{,}366}{2} = 920\,kg$$

Nous avons indiqué, dans la figure 65, les différentes charges concentrées qui agissent sur la poutre A et la position qu'elles occupent sur cette poutre.

La réaction de droite sur la poutre B' est égale à :

$$R_{B'} = \frac{7.000 \times 0{,}935 + 920 \times 1{,}095 + 7.000 \times 2{,}335 + 19.310 \times 3{,}27 + 6.000 \times 4{,}573}{6{,}540}$$

$$R_{B'} = 17.505\,kg$$

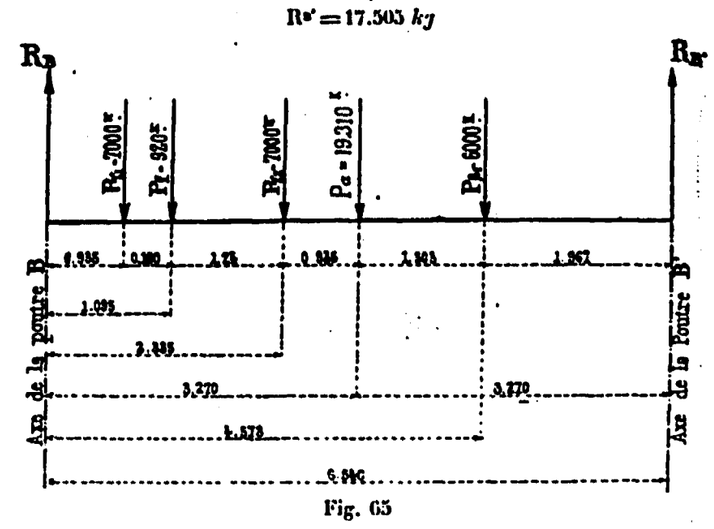


Fig. 65

Le moment fléchissant maximum de la poutre est égal à :

$$M_2 = 17.505 \times 3{,}27 - 6.000 \times 1{,}303 = 49.423.$$

Le moment total

$$M = M_1 + M_2 = 7.110 + 49.423 = 56.533.$$

La section de la poutre qui résiste à ce moment est figurée ci-contre (fig. 66).

Son moment d'inertie est égal à I = 0,021.213

$$\frac{I}{v} = \frac{0{,}021.213}{1{,}02} = 0{,}020.797.$$

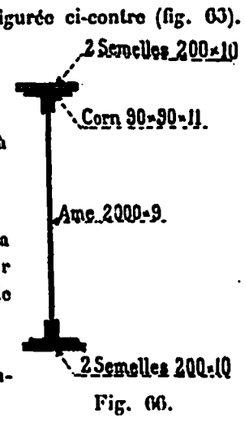


Fig. 66.

Le coefficient de travail maximum est donc égal à

$$R = \frac{56.533}{20.797} = 2{,}73\,kg$$

c) *Poutres* B *et* B'. — Les poutres B et B' ayant la même section, nous ne calculerons que la poutre, B sur laquelle la poutre A exerce une réaction plus grande que sur la poutre symétrique B'.

La portée est de 6,54 *m*.

La charge permanente par mètre courant se décompose comme suit :

Poids propre.....	384 *kg*
Plancher avec sa surcharge $\frac{1{,}095 + 1{,}768}{2} \times 570$ =	816
Total..... .	1.200 *kg*

Le moment maximum correspondant est égal à :

$$M_1 = \frac{1.200 \times \overline{6{,}54}^2}{8} = 6.416$$

La réaction de la poutre A est de :

Pour la charge uniforme de la poutre A : $\frac{1.330 \times 6.54}{2} = 4.530\,kg$

Pour les charges concentrées :

$$R_B = (P_{\gamma_1} + P_f + P_{\gamma_2} + P_a + P_{\beta_1}) - R_{B'}.$$

$$R_B = 7.000 + 920 + 7.000 + 19.310 + 6.000 - 17.505 = 22.725\,kg$$

Réaction totale : 27.255 *kg*

Moment maximum correspondant :

$$M_2 = \frac{27.255 \times 6.54}{4} = 41.562.$$

Moment maximum total :

$$M = M_1 + M_2 = 6.416 + 41.562 = 50.978\,kgm$$

La section de la poutre est figurée ci-dessous. Son moment d'inertie est égal à :

I = 0,016.425.

$$\frac{I}{v} = \frac{0{,}016.425}{1{,}01} = 0{,}016.262.$$

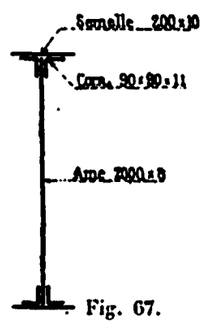


Fig. 67.

Le coefficient de travail maximum est :

$$R = \frac{50.978}{16.262} = 3{,}17\,kg$$

d) *Poutre* C. — Portée 6,54 *m*.

La charge permanente par mètre courant se décompose comme suit :

Poids propre de la poutre.....	265 *kg*
Plancher avec sa surcharge.... $\frac{3{,}27 + 1{,}768}{2} \times 570$ =	1.435
Total.....	1.700 *kg*

Le moment fléchissant maximum correspondant est :

$$M_1 = \frac{1.700 \times \overline{6,51^2}}{8} = 9.089.$$

De plus la poutre C résiste aux charges concentrées P_2, P_1, et P_3 que nous avons

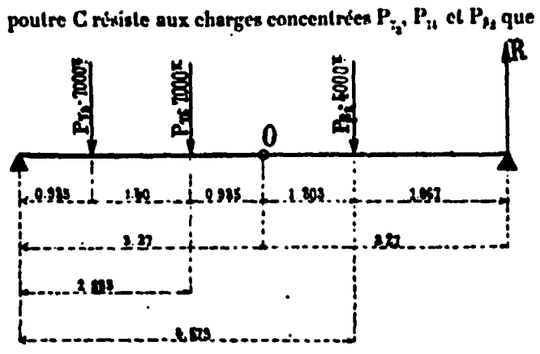


Fig. 68.

calculées plus haut et qui proviennent du réservoir et de l'escalier. Nous donnons, dans la figure ci-dessus, n° 68, le diagramme de ces charges.

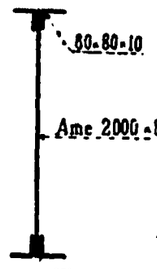


Fig. 69.

La réaction de droite R est égale à :

$$R = \frac{7.000(0,935 + 2,335) + 4.000 \times 4,573}{6,51} = 6.297\ kg$$

Le moment fléchissant correspondant au milieu 0 de la poutre a pour valeur :

$$M_2 = 6.297 \times 3,27 - 4.000 \times 1,303 = 15.380.$$

Le moment maximum total est :

$$M = M_1 + M_2 = 9.089 + 15.380 = 24.469.$$

La section de la poutre est figurée ci-contre. Son moment d'inertie est égal à :

$$I = 0,011.056.$$

$$\frac{I}{v} = 0,011.056.$$

Le coefficient de travail maximum est de :

$$R = \frac{24.469}{11.056} = 2,1\ kg$$

c) *Poutre* D. — Portée 3,005 *m*.

La charge permanente par mètre courant comprend :

Poids propre	...	210 *kg*
Plancher avec surcharge	....	$\frac{570 \times 1,50}{2} = 430$
Total	...	640 *kg*

Moment maximum correspondant :

$$M_1 = \frac{640 \times \overline{3,005^2}}{8} = 722.$$

La poutre D résiste de plus au milieu de sa portée à la charge P_3 que nous avons calculée plus haut et qui provient du poteau-guide de l'ascenseur Edoux. On a

$$P_3 = 21.100\ kg$$

Fig. 70.

Moment correspondant :

$$M_2 = \frac{21.100 \times 3,005}{4} = 15.852.$$

Moment maximum total :

$$M = M_1 + M_2 = 722 + 15.852 = 16.574.$$

La section de la poutre est figurée ci-contre. Son moment d'inertie est égal à :

$$I = 0,004.760.$$

$$\frac{I}{v} = \frac{0,004.760}{0,750} = 0,006.346$$

Le coefficient de travail maximum est :

$$R = \frac{16.574}{6.346} = 2,6\ kg$$

§ 2. — Plate-forme intermédiaire.

a) *Détermination des charges.* — Les charges que supportent les différentes poutres de ce plancher indiquées dans le diagramme ci-dessous (fig. 71) sont les suivantes :

a) Le poids propre des poutres ;

b) Les charges concentrées suivantes :

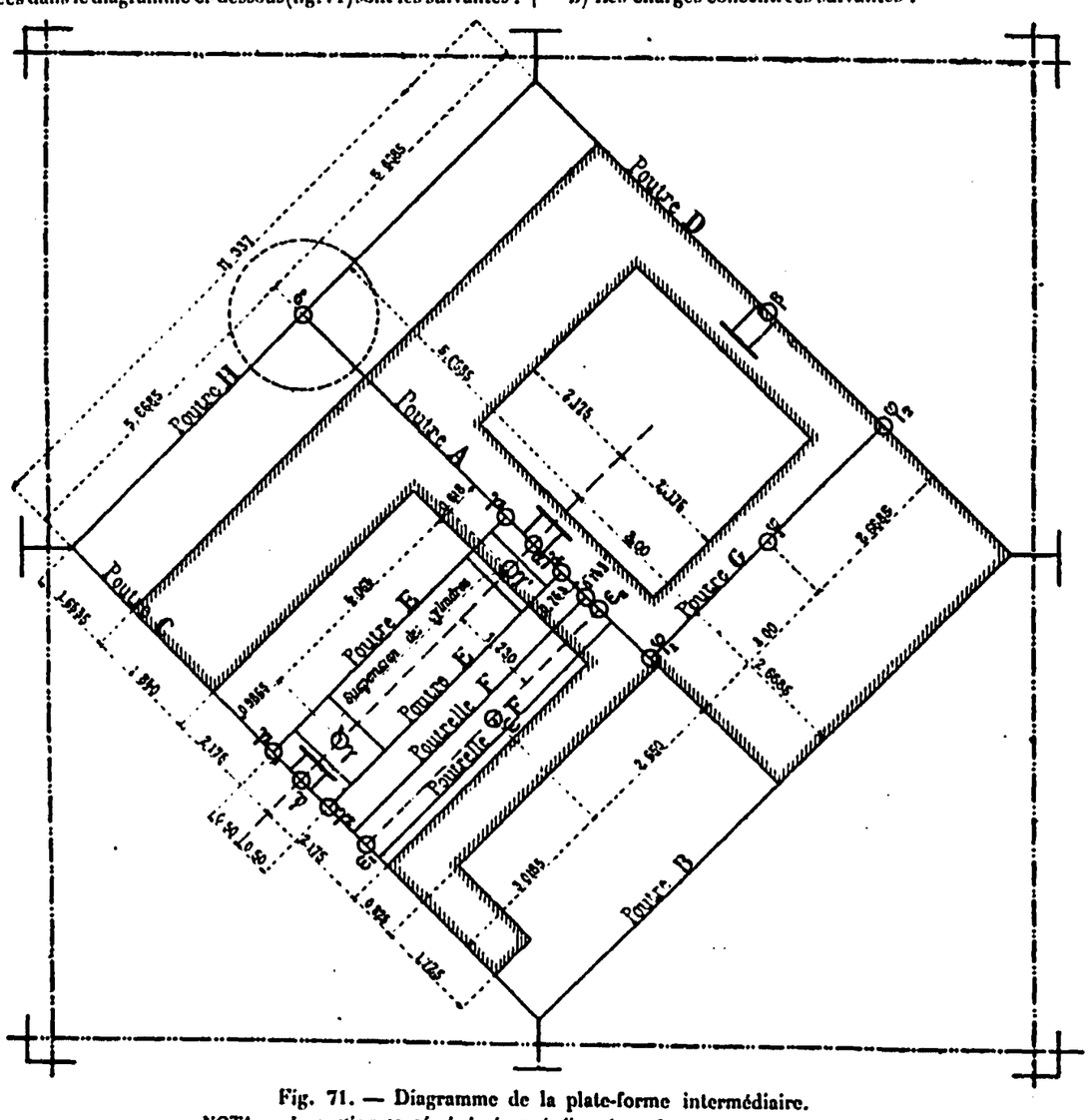


Fig. 71. — Diagramme de la plate-forme intermédiaire.

NOTA. — La partie entourée de hachures indique la surface occupée par le plancher.

1° Au centre α, sur la poutre A, une charge provenant du poteau central A et des colonnes-guides de l'ascenseur Edoux.

Nous supposerons que la poutre A du plancher intermédiaire porte la partie LM de ce poteau comprise entre les milieux L et M des hauteurs KO

et ON qui séparent le plancher intermédiaire de la troisième et de la quatrième plate-forme.

Le poids du poteau A et de sa colonne-guide est, comme nous l'avons vu, de 430 *kg* par mètre courant. La charge correspondante au point α est donc égale à :

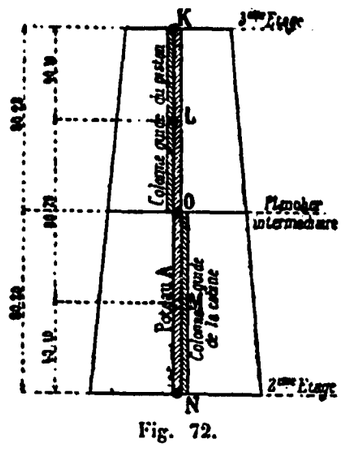


Fig. 72.

$$P_\alpha = 80{,}20 \times 430\,kg = 34.500\,kg$$

2° Au point β, une charge provenant du poteau-guide de la cabine qui s'attache sur la poutre D.

Le poids du poteau par mètre courant est de :

Poteau proprement dit.....	170 *kg*	570 *kg*
Colonne-guide de la cabine.....	200	
Tuyaux (eau comprise.....	200	

Nous supposerons que la moitié de ce poteau est suspendue à la poutre D et que l'autre moitié est portée par les poutres de la deuxième plate-forme. La longueur totale étant de 82 *m*, la charge sur la poutre D est égale à :

$$P_\beta = \frac{82 \times 570}{2} = 23.370\ kg.$$

3° A chacun des points γ et γ', on a une charge provenant de la suspension des cylindres de l'ascenseur Edoux qui est égale à :

Pour le cylindre.....	9.250 *kg*	P = 26.000 *kg*
« le piston.....	8.250	
« l'eau du cylindre.....	8.500	

Ces charges se transmettent sur les poutres A et C par l'intermédiaire des poutres E (fig. 73) et produisent :

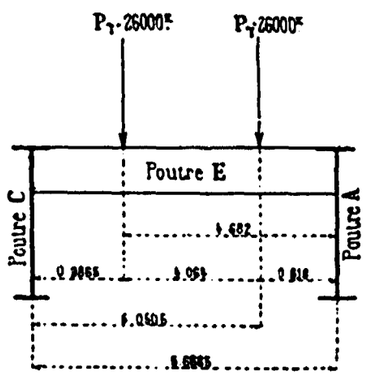


Fig. 73.

Sur la poutre A un effort de

$$\frac{26.000(0{,}9885 + 5{,}0505)}{5{,}6685} = 27.690\ kg$$

Sur la poutre C

$$\frac{26.000(0{,}618 + 4{,}682)}{5{,}6685} = 24.310\ kg$$

L'effort correspondant aux points d'attache γ_1, γ_2 des poutres E sur la poutre C est de :

$$P_{\gamma_1} = P_{\gamma_2} = \frac{24.310\,kg}{2} = 12.155\ kg$$

et aux points d'attache γ_3 et γ_4 de ces mêmes poutres sur la poutre A : $P_{\gamma_3} = P_{\gamma_4} = \frac{27.690\,kg}{2} = 13.845\ kg$

4° Au point δ sur la poutre H, on a la charge $P_\delta = 25.000\ kg$, provenant du réservoir (eau 22,800 m^3 + métal 2.200 *kg*).

5° Au point ε, on a la charge provenant de l'escalier de service inférieur. Nous supposerons que la moitié de cet escalier est suspendue aux poutrelles F et l'autre moitié portée par la poutre R du plancher du deuxième étage. Le poids de cet escalier par mètre courant est de : 200 *kg* plus une surcharge que nous supposerons être de 200 *kg*, soit au total 400 *kg*.

La longueur de cet escalier étant de 78 *m*, la charge concentrée au point ε est de :

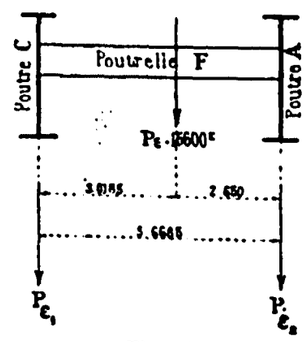


Fig. 74.

$$P_\varepsilon = \frac{400 \times 78}{2} = 15.600\ kg$$

Cette charge se transmet par l'intermédiaire des poutrelles F aux poutres A et C, elle produit sur la poutre C en ε_1, un effort

$$P_{\varepsilon_1} = \frac{15.600 \times 2{,}65}{5{,}6685} = 7.200\ kg$$

et en ε_2, sur la poutre A, un effort

$$P_{\varepsilon_2} = \frac{15.600 \times 3{,}0185}{5{,}6685} = 8.310\ kg$$

6° Au point φ, on a la charge de l'escalier de service supérieur, qui est porté par la poutre G. La longueur de cet escalier est de 57 *m*. La charge au point φ est donc égale à

$$P_\varphi = 400 \times 57 = 22.800\,kg$$

Cette charge est transmise par l'intermédiaire de la poutre G, aux poutres A et D (fig. 75).

Elle produit sur la poutre A en φ_1 un effort de :

$$P_{\varphi_1} = \frac{22.800 \times 2{,}6085}{5{,}6685} = 10.730\ kg$$

et sur la poutre D au point φ_2, un effort de :

$$P_{\varphi_2} = \frac{22.800 \times 3{,}00}{5{,}6685} = 12.070\ kg$$

7° Au milieu η de la poutre C, on a une charge P_η provenant du poteau-guide du cylindre, dans la partie supérieure. Nous avons vu dans le calcul des poutres du troisième étage, que le poids de ce poteau était de 620 *kg* par mètre courant et que la poutre D de ce plancher en portait la moitié. La charge en η sera donc :

$$P_\eta = \frac{470 \times 80}{2} = 18.800\ kg.$$

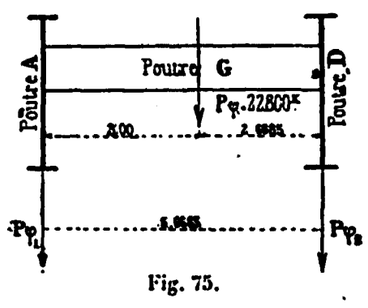


Fig. 75.

c) Nous avons aussi à tenir compte de la charge du plancher, dans la partie entourée de hachures, du diagramme (fig. 71).

La charge, uniformément répartie par mètre carré de plancher, se décompose comme suit :

Plancher en bois.....	50 *kg*
Fers I et poutrelles supérieures du plancher.....	50
Quoique l'accès du plancher soit interdit au public, nous supposerons néanmoins pour les cas exceptionnels une surcharge de.....	300
Total.....	400 *kg*

On verra plus loin que la charge uniforme du plancher produit dans les poutres des moments fléchissants et par suite des efforts qui sont très petits si on les compare à ceux que l'on obtient avec les charges concentrées. Nous nous contenterons en conséquence de supposer pour chaque poutre une largeur de plancher moyenne et constante.

b) *Poutre* A. — Portée 11,337 *m*.

Largeur du plancher supportée 1,50 *m*.

La charge uniforme par mètre courant est :

Poids propre de la poutre.....	500 *kg*
Plancher.....	400 × 1,50 = 600
Total.....	1.100 *kg*

Le moment correspondant est égal à :

$$M_1 = \frac{1.100 \times \overline{11{,}337}^2}{8} = 17.670.$$

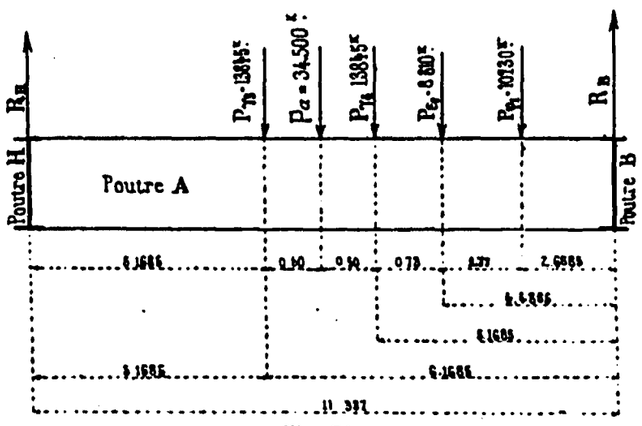


Fig. 76.

Nous avons indiqué dans le diagramme (fig. 76), les différentes charges concentrées qui agissent sur la poutre A et que nous avons calculées plus haut.

La réaction de gauche sur la poutre H est :

$$R_H = \frac{10.730 \times 2{,}6685 + 8.310 \times 4{,}1385 + 13.845 \times 5{,}1685 + 34.500 \times 5{,}6685 + 13.845 \times 6{,}1685}{11{,}337}.$$

$$R_H = 36.894\ kg$$

La réaction de droite sur la poutre B a pour valeur :

$$R_B = P_{\gamma_3} + P_\alpha + P_{\gamma_4} + P_{\varepsilon_2} + P_{\varphi_2} - R_H$$
$$R_B = 13.845 + 34.500 + 13.845 + 8.310 + 10.730 - 36.894$$
$$R_B = 44.336\ kg$$

Le moment fléchissant maximum au milieu de la poutre est égal à :

$$M_2 = 36.894 \times 5{,}6685 - 13.845 \times 0{,}50 = 202.210.$$

Le moment maximum total est donc :

$$M = M_1 + M_2 = 17.670 + 202.210 = 219.880.$$

La section de la poutre est figurée ci-contre (fig. 77). Son moment d'inertie est égal à :

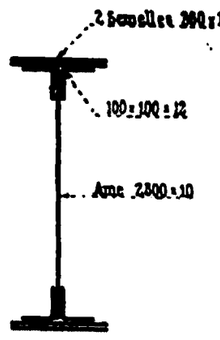


Fig. 77.

$$I = 0{,}044.812$$

$$\frac{I}{v} = \frac{0{,}044.812}{1{,}174} = 0{,}038.170.$$

Le coefficient de travail maximum est donc égal à :

$$R = \frac{219.880}{38.170} = 5{,}7\ kg$$

c) *Poutre* B. — Portée 11,337 *m*.

Largeur de plancher moyenne supportée par la poutre B, 1,50 *m*.

Le poids propre de la poutre B étant le même que celui de la poutre A, il en résulte que le moment dû à la charge uniforme est égal à celui trouvé plus haut pour cette poutre : $M_1 = 17.670$.

La seule charge concentrée à laquelle ait à résister la poutre B est la réaction de la poutre A.

La réaction due aux charges concentrées, que supporte la poutre A est 44.336 *kg*.

La réaction due à la charge uniforme de la même poutre est égale à :

$$\frac{11{,}337 \times 1.100}{2} = 6.235\ kg$$

La réaction totale de la poutre A est donc égale à :

$$44.336 + 6.235 = 50.571\ kg$$

Le moment correspondant a pour valeur :

$$M_2 = \frac{50.571 \times 11{,}337}{4} = 143.331$$

Le moment maximum total est :

$$M = M_1 + M_2 = 17.670 + 143.331$$

d'où $$M = 161.001.$$

La section de la poutre est figurée ci-contre (fig. 78), son moment d'inertie I est égal à :

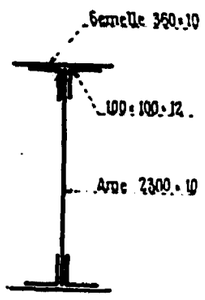


Fig. 78.

$$I = 0{,}031.084$$

$$\frac{I}{v} = \frac{0{,}031.084}{1{,}10} = 0{,}026.796$$

Le coefficient de travail correspondant a pour valeur :

$$R = \frac{161.001}{26.796} = 6\ kg$$

d) *Poutre* II. — Portée 11,337 *m*.

Poids propre par mètre courant : 500 *kg*

Moment fléchissant correspondant :

$$M_1 = \frac{500 \times \overline{11{,}337}^2}{8} = 8.033.$$

La poutre II supporte de plus, au milieu de sa portée, les charges suivantes :

Effort dû au réservoir	$P_3 = 25.000\ kg$
Réaction de la charge uniforme de la poutre A	$\frac{1.100\ kg \times 11{,}337}{2} = 6.235$
Réaction due aux charges concentrées de la même poutre	$R_{II} = 36.894$
Effort au milieu de la poutre II	68 129 *kg*

Moment maximum correspondant :

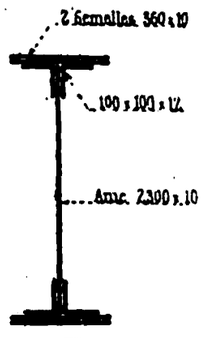


Fig. 79.

$$M_2 = \frac{68.129 \times 11{,}337}{4} = 193.095.$$

Moment maximum total :

$$M = M_1 + M_2 = 8.003 + 193.095 = 201.098.$$

La section de la poutre est figurée ci-contre (fig. 79). Son moment d'inertie :

$$I = 0{,}040.856 \qquad \text{et} \qquad \frac{I}{v} = \frac{0{,}040.856}{1{,}17} = 0{,}034.920.$$

Le coefficient de travail maximum est de :

$$R = \frac{201.098}{34.920} = 5{,}8\ kg$$

e) *Poutre* C. — Portée 11,337 *m*.

Largeur moyenne de plancher, supportée par la poutre C : 1,00 *m*.

Charge uniforme par mètre courant :

Poids propre de la poutre	500 *kg*
Plancher	$1{,}00 \times 400 = 400$
Total	900 *kg*

Moment maximum correspondant :

$$M_1 = \frac{900 \times \overline{11{,}337}^2}{8} = 14.460.$$

Les charges concentrées que supporte la poutre C ont été calculées plus haut et sont indiquées dans la figure 80.

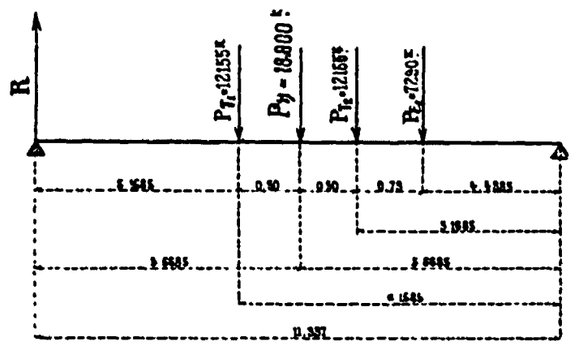


Fig. 80.

La réaction de gauche est égale à :

$$R = \frac{18.800}{2} + \frac{12.155(5{,}1685 + 6{,}1685) + 7.290 \times 4{,}4385}{11{,}337} = 21.366\ kg$$

Le moment maximum correspondant au milieu de la poutre est égal à :

$$M_2 = 21.366 \times 5{,}6685 - 12.155 \times 0{,}50 = 132.040.$$

Le moment maximum total est donc :

$$M = M_1 + M_2 = 14.460 + 132.040 = 146.500.$$

La section de la poutre qui résiste à ce moment est la même que pour la poutre II. On a donc :

$$\frac{I}{v} = 0{,}034.920 \qquad \text{et} \qquad R = \frac{146.500}{34.920} = 4{,}20\ kg$$

f) *Poutre* D. — Portée 11,337 *m*

Largeur moyenne de plancher supportée par cette poutre, 1,50 *m*.

Charge uniforme par mètre courant :

Poids propre de la poutre	400 *kg*
Plancher	$1{,}50 \times 400 = 600$
Total	1.000 *kg*

Le moment fléchissant correspondant est de :

$$M_1 = \frac{1.000 \times \overline{11{,}337}^2}{8} = 16.066.$$

Les charges concentrées que supporte la poutre D, ont été calculées plus haut et sont indiquées dans la figure 81.

La réaction sur l'appui de gauche est égale à :

$$R = \frac{23.370}{2} + \frac{12.070 \times 2{,}6685}{11{,}337} = 14.576\ kg$$

Le moment fléchissant maximum correspondant au milieu de la poutre est égal à :

$$M_2 = 14.576 \times 5{,}6685 = 82.624.$$

Le moment maximum total est égal à :

$$M = M_1 + M_2 = 16.066 + 82.624 = 98.690.$$

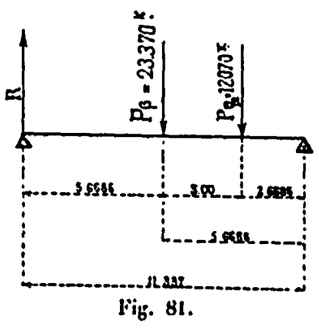


Fig. 81.

La section de la poutre est figurée ci-dessous (fig. 82). Son moment d'inertie est égal à :

$$I = 0{,}025.267$$

$$\frac{I}{v} = \frac{0{,}025.267}{1{,}159} = 0{,}021.800$$

Le coefficient de travail maximum est de :

$$R = \frac{98.690}{21.800} = 4{,}5 kg$$

Treillis. — L'effort tranchant maximum sur l'appui de droite a pour valeur :

$$T = 23.370 + 12.070 - 14.576 + \frac{1.000 \times 11{,}337}{2}$$

d'où $T = 26.532\ kg$. Le treillis étant double et l'angle d'inclinaison α étant de 53° environ, l'effort Q dans une barre sera de :

$$Q = \frac{T}{2} \times \frac{1}{\sin \alpha} = \frac{26.532}{2 \times 0{,}8} = 16.583\ kg$$

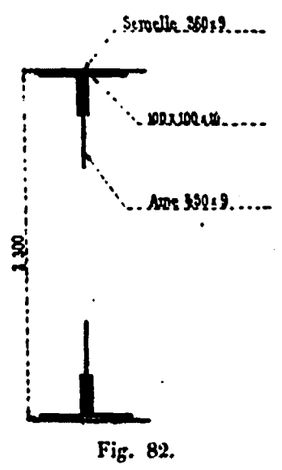


Fig. 82.

Chaque barre étant composée de deux cornières de 80 × 80 × 9, sa section est $2 \times 1.350 = 2.718\ mm^2$ et le coefficient de travail $R = \frac{16.583}{2.718} = 6{,}1\ kg$.

§ 3. — Poutres d'ascenseurs.

Chaque chemin d'ascenseur est formé par deux poutres en treillis de 1,30 *m* de hauteur, maintenues à un espacement de 3,40 *m* (voir fig. 24, 25, 26, pl. XXII$_3$), par des entretoises inférieures et un contreventement. Elles sont attachées aux grandes entretoises des arbalétriers chacune par deux goussets à peu près horizontaux, venant se fixer sur des barres de treillis spéciales.

La partie comprise entre le sol et le premier étage, qui est la plus inclinée, est aussi la plus fatiguée; c'est la seule dont nous aurons à nous occuper. L'espacement des appuis y est de la moitié de la hauteur du panneau, soit 6,748 *m*. Le dernier tronçon reposant sur la maçonnerie, ayant une portée de 10,50 *m*, c'est pour celui-ci que nous établirons les calculs.

Nous n'y ferons pas entrer la semelle de la membrure supérieure de la poutre; celle-ci est simplement destinée à donner à cette membrure, qui n'est pas reliée à la construction entre deux points d'appui, la raideur transversale et la résistance aux efforts transversaux qui pourraient être produits par les galets de la cabine d'ascenseur.

La charge permanente par mètre courant est la suivante :

Poids propre d'une poutre	160 *kg*.
Voie et accessoires	80
Total au mètre courant	240 *kg*.

La composante normale à la poutre, qui est inclinée à 54°35'20", est égale à

$$240 \times \cos 54°35'20" = 240 \times 0{,}58 = 140\ kg.$$

Le moment fléchissant dû à la charge permanente est égal à :

$$\frac{140 \times \overline{10{,}5}^2}{8} = 1.929.$$

La position de la cabine d'ascenseur qui donne les moments fléchissants maximums est celle où un galet de 3750 *kg*. se trouve au milieu de la poutre.

La composante normale à la poutre pour un galet est égale à :

$$3.750 \times 0{,}58 = 2.175\ kg.$$

Le moment fléchissant maximum correspondant est égal à :

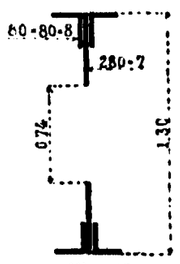


Fig. 83.

$$\frac{2.175 \times 10{,}5}{4} = 5.709.$$

Le moment fléchissant maximum total est égal à :

$$1.929 + 5.709 = 7.638.$$

La section de la poutre est celle figurée ci-contre.
On a pour cette section :

$$I = 0{,}0020000$$

$$\frac{I}{v} = \frac{0{,}0020000}{0{,}65} = 0{,}004551.$$

Le coefficient de travail correspondant est de :

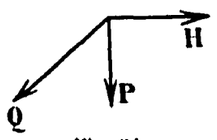


Fig. 84.

$$R = \frac{7.638}{4.551} = 1{,}67\ kg \text{ par } mm^2.$$

Par suite de la disposition des attaches, qui sont surtout résistantes dans le plan horizontal et qui ne donnent pas dans le plan vertical une fixité absolue, soit par le pliage des goussets soit par une rotation possible de l'entretoise, on ne peut compter que la réaction P des appuis passe en entier par cette entretoise. Elle doit se décomposer en une force H horizontale passant par les goussets, et en une force Q longitudinale, laquelle se transmet de proche en proche jusqu'à la partie inférieure.

La somme de ces forces, du premier étage au sol, est égale à :

$$\frac{240 \times 75}{\sin 54°35'20"} = 22.000\ kg,$$

240 *kg* étant le poids au mètre courant de la poutre et de la voie,
75,00 *m* la longueur de la poutre.

La section d'une membrure étant de :

Ame	$280 \times 7 = 1.960$
2 cornières $80 \times 80 \times 8$	$= 2.432$
Total	4.392 mm^2.

Le coefficient de travail correspondant dans les membrures est de :

$$\frac{22.000}{2 \times 4.392} = 2{,}50\ kg.$$

Le coefficient de travail total est égal à :

$$1{,}67 + 2{,}50 = 4{,}17\ kg.$$

Quant à la charge de la cabine, dont le poids total est de 15.000 *kg*, soit 7.500 *kg* par poutre, nous admettrons que les appareils de sûreté venant à fonctionner par suite d'une rupture, l'effort qui résultera de l'arrêt brusque de la cabine sera doublé, c'est-à-dire que la composante longitudinale sera calculée avec un poids de 15.000 *kg* par poutre.

L'effort supplémentaire en résultant est de :

$$\frac{15.000}{2 \times 4.392} = 1{,}7\ kg.$$

soit un coefficient total de $4{,}17 + 1{,}7 = 5{,}87\ kg$.

Treillis. — L'effort tranchant sur appui pour la charge permanente est égal à :

$$\frac{140 \times 10{,}5}{2} = 735\ kg.$$

L'écartement des galets d'ascenseur étant de 8,109 *m*, l'effort tranchant maximum dans la poutre, résultant de la surcharge, se produit quand l'un des galets se trouve sur un appui; il est égal à :

$$T = 2.175 + \frac{2.175 \times 2{,}39}{10{,}50} = 2.670\ kg.$$

L'effort tranchant total est par suite égal à :

$$735 + 2.670 = 3.405\ kg.$$

Suivant la direction des barres, l'effort est de $3.405 \times 1{,}20 = 4.086\ kg$, et par barre

$$\frac{4.086}{2} = 2.043\ kg.$$

Les barres sont composées de cornières de $70 \times 70 \times 7$, de 1.056 mm^2 de section.

Le coefficient de travail correspondant est de :

$$\frac{2.043}{1.056} = 1{,}93\ kg.$$

L'attache de chaque barre sur la membrure est faite au moyen de trois rivets de 20 *mm* de diamètre donnant une section de $3 \times 314 = 942\ mm^2$.

Le travail des rivets est de : $\frac{2.043}{942} = 2{,}1\ kg$.

CHAPITRE VII

INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE. — STABILITÉ. — FONDATIONS ET FLÈCHE.

§ 1. — Influence de la température.

Les changements de température tendent à augmenter ou à diminuer l'écartement des montants ; mais comme ceux-ci sont rendus fixes par la nature même de la construction, l'effet de cette variation est de donner naissance à une poussée qui est précisément égale à celle qu'il faudrait appliquer à chaque montant pour le ramener dans sa position primitive, si son extrémité était libre de se mouvoir.

Cette poussée peut se déterminer avec une approximation suffisante, en admettant que chacun des montants constitue une poutre encastrée au niveau du premier étage.

Nous admettrons que la Tour ne subira jamais une variation de plus de 30° au-dessus et au-dessous de la température à laquelle a été fait le montage.

En supposant que la base puisse se dilater librement, la dilatation pour chaque pied serait, par rapport à l'axe, $\delta = 50{,}7\,m \times 0{,}000012 \times 30^\circ = 0{,}018\,m$, 0,000012 étant le coefficient de dilatation du fer.

La poussée P est donnée par la formule connue de la flexion, $f = \frac{1}{3}\frac{Pl^3}{EI}$, dans laquelle :

f est la flèche que nous venons de déterminer ;
P, la poussée agissant à la base du montant ;
$l = 55\,m$, la distance de la force P au-dessous du point d'encastrement du montant ;
$E = 16 \times 10^9$, le coefficient d'élasticité du fer ;
I, le moment d'inertie du montant.

Comme les sections des arbalétriers diffèrent très peu les unes des autres dans les sections XXIV à XXVIII, où se produit cette flexion, nous admettrons pour chacun d'eux une section moyenne de 80.000 mm^2. La section droite du montant ayant 13,67 m de côté, le moment d'inertie I est alors égal à :

$$I = 4 \times \left(\frac{13{,}67}{2}\right)^2 \times 0\,m^2,08 = 14{,}95$$

et la poussée P a pour valeur :

$$P = \frac{3EIf}{l^3} = \frac{3 \times 16 \times 10^9 \times 0{,}0182 \times 14{,}95}{55^3} = 78.500\ kg.$$

Le moment fléchissant au point d'encastrement, qui est le point le plus fatigué, est de :

$$M = 78.500 \times 55 = 4.317.500\ ;$$

l'effort correspondant dans un arbalétrier d'angle, en tenant compte de l'action de la température dans les deux faces, a pour valeur : $\frac{4.317.500}{13{,}67} = 315.830\ kg.$

Le coefficient de travail correspondant est égal à : $\frac{315.830}{80.000} = 3{,}9\ kg.$

Ce coefficient de travail ne doit pas être ajouté à celui que donne le vent, car on ne peut admettre un vent de 300 ou de 400 kg que par une température moyenne.

Les variations de température n'ont aucune influence sur la partie supérieure de la Tour comprise entre le campanile et le deuxième étage, laquelle peut se dilater librement. On peut admettre que l'effet des variations de température sur le tronçon compris entre le premier et le deuxième étage se traduit par une augmentation de hauteur qui s'opère librement.

§ 2. — Stabilité.

L'effort de compression total à la partie inférieure d'un montant (section XXVIII) a été trouvé égal à 2.895.000 (tableau p. 27) et l'effort maximum du vent, qui tend à arracher le montant de ses maçonneries, a lieu dans la première hypothèse pour le vent uniforme de 300 *kg* par m^2.

Il a été trouvé égal à 1.342.000 *kg* (tableau p. 41).

Il y a donc pour chaque montant un excès de stabilité de 2.895.000 *kg* — 1.342.000 *kg* = 1.553.000 *kg*.

Le degré de sécurité a encore été notablement augmenté en amarrant chacun des quatre arbalétriers des montants au massif du soubassement, au moyen de deux tirants qui intéressent un bloc de maçonnerie de 132 m^3 pesant $132 \times 2.500 = 330.000$ *kg*.

L'effort total dans un montant qui serait nécessaire pour produire un renversement est de :

$$2.895.000\ kg + 4 \times 330.000\ kg = 4.215.000\ kg.$$

C'est-à-dire qu'il faudrait un effort du vent $\frac{4.215.000}{1.342.000} = 3{,}14$ fois plus fort que celui du vent de 300 *kg*.

En d'autres termes, le coefficient de sécurité est d'environ 3 par rapport à cette hypothèse, qui est elle-même au-dessus de la réalité.

§ 3. — Charges sur les maçonneries et sur le sol de fondations.

Le calcul de la pression du béton sur le sol de fondations a été fait sur l'épure (pl. XXXIV) pour les massifs B, C et D des piles 1, 2, 3 et 4. Nous ne considérons pas le massif A, parce que son bloc de béton a une surface plus grande que celle des autres massifs de la même pile.

Pour chaque pile, la pression sur le sol a été déterminée dans les deux cas suivants :

1° Aucun vent n'agit sur la Tour.

L'effort d'un arbalétrier sur le massif en maçonnerie est alors de 723.750 *kg* (tableau p. 27).

2° L'effort dû au vent dans les arbalétriers vient s'ajouter à celui du poids propre.

C'est la première hypothèse (vent de 300 *kg*) qui donne les efforts maximums.

Nous avons, du fait du vent, dans un arbalétrier (tableau p. 41) un effort de 351.500 *kg*, qui ajouté à celui résultant des charges, donne un total de 351.500 *kg* + 723.750 *kg*; soit 1.075.250 *kg*.

Il est facile d'en déduire les charges sur les maçonneries.

Les appuis reposent sur des sommiers en pierre de taille de Château-Landon présentant une résistance à l'écrasement de 1.235 *kg* par centimètre carré.

La surface placée immédiatement au-dessous du métal de ces appuis est représentée par un losange de $2{,}50 \times 2{,}30$ donnant une surface de 57.500 cm^2.

Le coefficient de compression est donc de $\frac{1.075.250}{57.500} = 18{,}70$ *kg* par cm^2.

Les sommiers reposent eux-mêmes sur des massifs de maçonnerie brute en pierre calcaire provenant des carrières de Souppes et hourdée en ciment de Portland de Boulogne.

La surface supérieure de ces massifs est de $4{,}40 \times 4{,}00 = 17{,}60$ m^2, le cœfficient de compression est de $\frac{1.075.250}{176.000} = 6{,}11$ *kg* par cm^2.

Cet effort et le précédent sont très inférieurs à la résistance réelle et donnent un grand excès de sécurité.

Il reste à déterminer la pression sur le sol de fondation.

Le prisme quadrangulaire qui charge la surface inférieure du bloc de béton a été divisée en 6 éléments, dont on a calculé le poids en admettant pour la maçonnerie une densité de 2.500 *kg* et pour la terre une densité de 1.800 *kg*.

Les efforts des arbalétriers ont été composés avec la résultante de ces poids, qui sont appliqués au centre des éléments.

On obtient ainsi pour chaque massif et pour chacun des deux cas considérés, la résultante R de toutes les forces qui agissent sur la surface inférieure du bloc de béton (fig. 85).

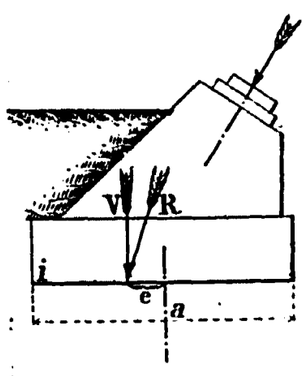


Fig. 85.

Soient : *e* le désaxement de cette résultante par rapport au milieu de la surface :

V, sa composante verticale;

a, la longueur du bloc de béton;

b, sa largeur.

Le coefficient de travail maximum a lieu dans la fibre extrême *i*; il a pour valeur :

$$R = \frac{V}{ab} + \frac{Ve \times 6}{ab^2}$$

On trouve ainsi les coefficients de travail suivants :

	AVEC LE VENT.	SANS LE VENT.
Pile N° 1	5,3 *kg* par *cm²*	4,5 *kg* par *cm²*
» N^os 2 et 3	5,1 *kg* »	4,2 *kg* »
» N° 4	4,9 *kg* »	4,1 *kg* »

Ce sol étant composé de sable et gravier sur une grande épaisseur, la résistance qui lui est imposée est beaucoup au-dessous de celle dont il est capable, et toute crainte d'un tassement quelconque doit être écartée.

§ 4. — Calcul de la flèche produite par le vent.

Portion de la flèche due à la partie inférieure. — Pour le calcul des flèches, la Tour a été divisée en un certain nombre d'éléments. On a calculé quel est le déplacement horizontal du sommet de la Tour par l'effet des déformations que subit chaque élément. Cette division en éléments est partout la même que celle dont on s'est déjà servi dans le calcul des efforts dus au vent.

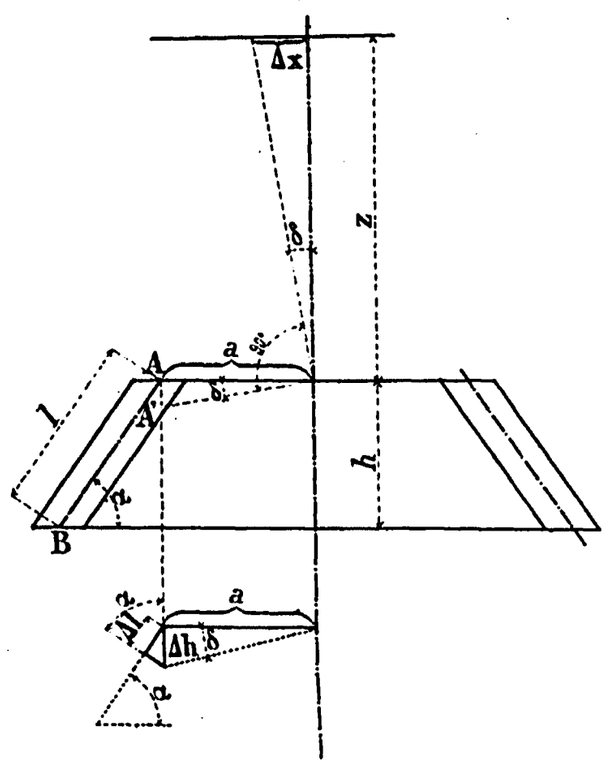


Fig. 86.

Considérons un élément de la partie inférieure (fig. 84).

Soient *h*, la hauteur de cet élément,

N, l'effort de compression dû au vent, dans un montant,

Ω, la surface de la section des quatre arbalétriers du montant.

La longueur *l* du montant de l'élément se raccourcit ou s'allonge de : $\Delta l = \frac{lN}{\Omega E}$,

$E = 16 \times 10^9$ étant le coefficient d'élasticité du fer.

La hauteur *h* de la fibre moyenne reste constante puisque la longueur d'un des montants augmentant, l'autre diminue de la même quantité. Nous pouvons admettre de plus que la largeur *a* est invariable puisqu'aucun effort ne s'exerce dans cette direction.

Le déplacement vertical AA′ du point A sera, par suite,

$$AA' = \Delta h = \frac{\Delta l}{\sin \alpha} = \frac{lN}{\Omega E \sin \alpha}.$$

Il en résulte que toute la construction située au-dessus de l'élément subira une rotation δ telle que $\operatorname{tg} \delta = \frac{\Delta h}{a} = \frac{lN}{\Omega E a \sin \alpha}$. Cette rotation produit au sommet de la Tour un déplacement :

$$\Delta x = z \operatorname{tg} \delta = \frac{zlN}{\Omega E a \sin \alpha}.$$

En faisant la somme de tous ces déplacements partiels on obtient la flèche totale *f*, produite par la déformation de la partie inférieure de la Tour, c'est-à-dire que l'on a :

$$f = \Sigma \left(\frac{zlN}{\Omega E a \sin \alpha} \right).$$

La valeur $\frac{l}{\sin z}$ a été mesurée sur l'épure (pl. XXXII) pour chaque élément.

NUMÉROS DES ÉLÉMENTS.	z.	s.	$\frac{l}{\sin z}$	Ω.	VENT DE 300k. N.	VENT DE 300k. $\frac{sN}{\Omega E \sin z}$	VENT DE 200k à 400k N.	VENT DE 200k à 400k $\frac{sN}{\Omega E \sin z}$
	m.	m.	m.	mm².	T.	m.	T.	m.
18.....	189,45	11,02	7,65	193.812	1.105	0,0469	1.100	0,0466
19.....	196,90	12,54	10,45	226 824	1.108	0,0500	1.105	0,0499
20.....	207,00	14,50	11,00	218.308	1.115	0,0501	1.110	0,0498
21.....	217,60	16,70	11,70	230.480	1.124	0,0460	1.115	0,0460
22.	228,60	19,25	11,90	254.784	1.140	0,0380	1.128	0,0391
23.....	239,60	22,22	10,45	252.704	1.155	0,0321	1.142	0,0318
A reporter...						0,264		0,2032

NUMÉROS DES ÉLÉMENTS.	z.	s.	$\frac{l}{\sin z}$	Ω.	VENT DE 300k. N.	VENT DE 300k. $\frac{sN}{\Omega E \sin z}$	VENT DE 200k à 400k N.	VENT DE 200k à 400k $\frac{sN}{\Omega E \sin z}$
	m.	m.	m.	mm².	T.	m.	T.	m.
Report.....						0,264		0,2032
24.....	248,60	25,24	11,1	300.636	1.200	0,0258	1.183	0,0263
25.....	257,60	29,39	13,8	319.968	1 240	0,0292	1.225	0,0290
26.....	268,60	34,92	13,8	329.568	1.278	0,0257	1.250	0,0251
27.....	279,60	40,45	13,8	337.568	1.313	0,0232	1.275	0,0223
28...	290,60	45,98	11,8	340.768	1.342	0,0183	1.295	0,0177
Totaux...						0,3862		0,3836

b) *Portion de la flèche due à la partie supérieure.* — La flèche de la partie supérieure s'obtient comme pour une poutre quelconque travaillant en porte-à-faux, encastrée à l'une de ses extrémités et soumise à la flexion.

Soient Δy, la longueur d'un élément, y, sa distance au sommet de la Tour, M, le moment fléchissant dû au vent et agissant dans l'élément; I, le moment d'inertie de la section de l'élément.

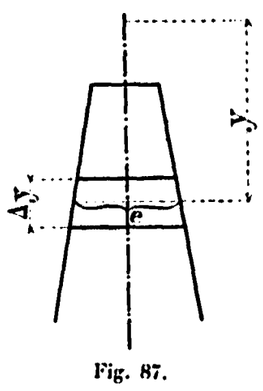


Fig. 87.

Les déformations de cet élément produisent au sommet de la Tour une flèche de : $\frac{M \Delta y \times y}{EI}$ et la flèche totale provenant des efforts du vent dans la partie supérieure sera de : $f' = \Sigma\left(\frac{M \Delta y \times y}{EI}\right)$.

Dans le tableau suivant, nous résumons le calcul de cette flèche dans chacune des deux hypothèses de surcharge du vent. Les moments fléchissants M ont été déterminés précédemment pour chaque élément dans le calcul des efforts. Les moments d'inertie I ont été calculés par la formule : $I = 2\omega\left(\frac{e}{2}\right)^2 = \frac{\omega e^2}{2}$ où ω représente la surface de la section de tous les arbalétriers d'une face, e l'écartement horizontal des deux faces opposées.

NUMÉROS DES ÉLÉMENTS.	Δy.	y.	ω.	e.	I.	VENT DE 300k M.	VENT DE 300k $\frac{M \Delta y \times y}{EI}$	VENT DE 200k à 400k M.	VENT DE 200k à 400k $\frac{M \Delta y \times y}{EI}$
	m.	m.	mm².	m.		m. k.	m.	m. k.	m.
1....	8,91	43,43	83.936	10,57	4,7	1.782.638	0,0092	2.281.739	0,0117
2....	6,31	49,60	97.936	11,17	6,11	2 522.928	0,0080	3.222.547	0,0104
3....	6,70	56,12	Id.	11,81	6,83	3.423.121	0,0118	4.361.002	0,0150
4....	7,08	63,00	Id.	12,48	7,64	4.506.121	0,0165	5.723 035	0,0208
5....	7,49	70,29	Id.	13,19	8,52	5.797 739	0,0224	7.337.958	0,0283
6....	7,92	77,98	Id.	13,91	9,53	7 327.197	0,0296	9 238.161	0,0374
7 ...	8,37	86,11	Id.	14,74	10,70	9.127.111	0,0384	11.459.283	0,0482
8....	8,84	94,71	129.936	15,58	15,80	11.234.666	0,0372	14.041.392	0,0465
9....	9,34	103,80	Id.	16,46	17,60	13.691.066	0,0471	17.027.506	0,0584
A reporter							0,2202		0,2767

NUMÉROS DES ÉLÉMENTS.	Δy	y.	ω.	e.	I.	VENT DE 300k M.	VENT DE 300k $\frac{M \Delta y \times y}{EI}$	VENT DE 200k à 400k M.	VENT DE 200k à 400k $\frac{M \Delta y \times y}{EI}$
	m.	m.	mm².	m.		m. k.	m.	m. k.	m.
Report.							0,2202		0,2767
10....	9,80	113,40	135.936	17,40	20,60	16.584.751	0,0559	20.511.837	0,0692
11....	10,00	123,40	168.150	18,50	28,80	19.957.151	0,0535	24.529.137	0,0656
12....	10,25	133,40	183.228	20,01	36,60	23 696.551	0,0556	28.935.437	0,0675
13....	10,50	143,90	Id.	21,60	42,70	28.036.306	0,0619	33.990.557	0,0751
14....	10,55	154,40	203.228	23,60	56,60	32.818.216	0,0590	39.493 817	0.0710
15....	10,65	165,00	213.228	25,80	71,00	38.114.082	0,0589	45.513.239	0,0704
16....	11,00	175,70	Id.	28,67	87,60	43.957.459	0,0604	52.070.520	0,0718
17....	8,10	187,00	Id.	31,70	107,00	50.923.218	0,0450	59.745.250	0,0530
Totaux							0,6604		0,8203

c) *Flèche totale.* — Les flèches totales ont donc pour valeur :

Première hypothèse (vent de 300 k.). . . . . 0,3862 + 0,6604 = 1m,0466
Deuxième » (vent de 200 à 400 k.). . . 0,3836 + 0,8203 = 1m,2039

d) *Calcul de la flèche pour le vent de 100 à 300 kilos.* — Pour l'hypothèse du vent variant de 100 à 300 k. de la base au sommet de la Tour, nous pouvons déterminer la flèche totale résultant des défor-

mations de la partie inférieure et de la partie supérieure, au moyen des chiffres des tableaux précédents et des rapports λ déjà considérés dans le calcul des efforts du vent ; nous obtenons ainsi les tableaux ci-dessous :

Partie inférieure.

NUMÉROS DES ÉLÉMENTS.	RAPPORTS λ.	$\frac{\pm N}{\Omega E \sin \alpha} \times \lambda$.
		m.
18	0,632	0,029
19	0,623	0,031
20	0,612	0,030
21	0,601	0,028
22	0,59	0,023
23	0,578	0,018
24	0,568	0,015
25	0,555	0,016
26	0,537	0,014
27	0,523	0,012
28	0,507	0,009
Total f'		0,225

La flèche totale de la Tour, dans cette troisième hypothèse, est donc de

$$f' + f'' = 0{,}225 + 0{,}558 = 0^{m}{,}783.$$

Partie supérieure.

NUMÉROS DES ÉLÉMENTS.	RAPPORTS λ.	$\lambda \times \frac{M \Delta y \times y}{EI}$
		m.
1	0,730	0,0085
2	0,727	0,0075
3	0,723	0,011
4	0,720	0,015
5	0,716	0,020
6	0,712	0,026
7	0,708	0,034
8	0,703	0,033
9	0,698	0,041
10	0,692	0,048
11	0,685	0,045
12	0,678	0,046
13	0,671	0,050
14	0,663	0,047
15	0,654	0,046
16	0,646	0,046
17	0,636	0,034
Total f''		0,558

En terminant l'exposé de ces laborieux calculs, nous ne saurions passer sous silence qu'ils ont été tout d'abord effectués sous la direction de M. Maurice Kœchlin, notre ingénieur, par M. Henri Kœchlin, son frère, chef de notre bureau des études, qui a été son constant collaborateur.

APPENDICE

CALCUL DES SURFACES EXPOSÉES AU VENT

Surface de l'élément 0 (Panneau 20 et campanile) divisée en 7 éléments.

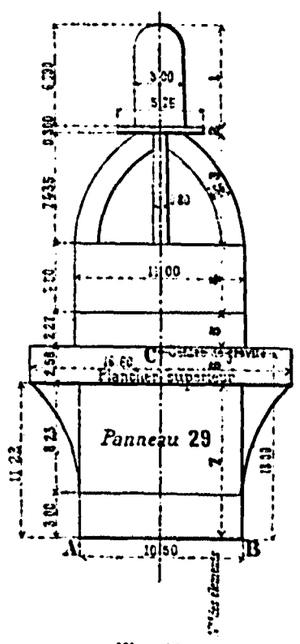


Fig. 88.

N° des éléments.	Surfaces.	m²
1	6,79×3,00 =	20,40
2	5,75(0,30+0,10) =	2,30
3 Contreliche (1).	2×1,50×9 = 27	31,80
3 Escalier	6×0,8 = 4,80	
4	4,5×11,00 =	49,50
5	2,27×11,00 =	25,00
6	2,58×16,60 =	43,00
7 Panneau 29 (2)	(16,60+10,50)/2 ×8,23 = 112,00	143,50
	10,50×3,00 = 31,50	
	Surface totale.....	315,50

Recherche du centre d'action (Moments par rapport à AB).

N° des éléments.	Surfaces.	Bras de levier.	Produits.
	m²	m	
1	20,20	31,71	650
2	2,30	28,17	65
3	31,80	24,30	770
4	49,50	18,33	910
5	25,00	14,95	375
6	43,00	12,52	540
7	143,50	5,62	810
Totaux..	315,50	»	4120

Le centre de gravité est donc à $\frac{4120}{315,5} = 13^m,00$ au-dessus de AB.

(1) Nous comptons 2 contreliches pleines. — (2) Le panneau 29 est supposé plein.

Surfaces offertes au vent dans les panneaux 20 à 28.

Les éléments sont constitués par deux demi-panneaux consécutifs. Comme la construction est la même, nous adoptons pour tous ces panneaux une surface constante par mètre courant qui résultera du calcul de la surface d'un panneau moyen, le panneau 26. Dans ce but, calculons, d'abord :

1° *Surface offerte au vent par mètre courant de barre de treillis.*

1re *Face.* — Panneau complet..... $0^m,650 \times 0,50 = 0^{m2},325$

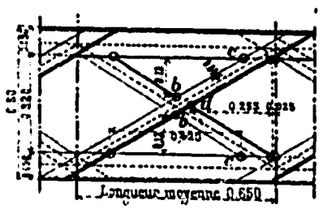


Fig. 89.

A soustraire pour les vides :

$$2\times\frac{0,13\times0,42}{2}=0,0546$$
$$2\times\frac{0,255\times0,32}{2}=0,0816$$
$$2\times0,025\times0,32=0,016$$
$$\Big\}\ 0,1522$$

Total des vides de la 1re face.. $0^{m2},1522$

Reste pour la 1re face.... $0^{m2},1728$

ou par mètre courant $\frac{0,1728}{0,650} = 0^{m2},266$.

Rapport des vides à la surface supposée pleine $\frac{0,1522}{0,325} = 0,47$.

2me *Face.* — La surface est $0,266\times0,47 = 0,125$ par mètre courant.

Surface totale : $0^{m2},266 + 0^{m2},125 = 0^{m2},391$ soit $0^{m2},40$ par mètre courant.

2° *Entretoises horizontales.*

1re *Face :*

Panneau complet. $0,800\times0,6 = 0^{m2},480$

A soustraire pour les vides :

$$2\times\frac{0,58\times0,19}{2}=0,110$$
$$2\times\frac{0,34\times0,44}{2}=0,150$$
$$2\times\frac{0,015\times0,44}{2}=0,013$$
$$\Big\}\ 0,273$$

Total des vides de la 1re face... $0^{m2},273$

Reste pour la 1re face ... $0^{m2},207$

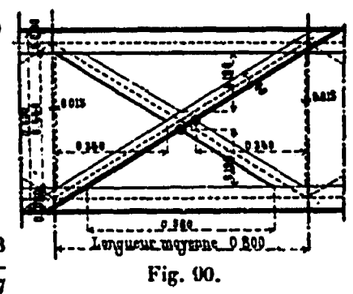


Fig. 90.

ou par mètre courant $\frac{0,207}{0,800} = 0,26$.

Rapport des vides au plein $\frac{0,273}{0,480} = 0,57$.

2me *Face.* — La surface à compter est $0,26\times0,57 = 0,15$ par mètre courant.

Surface totale : $0,26 + 0,15 = 0,41$.

Nous prendrons 0,42 par mètre courant.

Surface du panneau 26.

		m²
1re *Face.* — Arbalétriers *c*.....	2×6m,90×0m,525 =	7,30
— *bd*....	6,80×0,500 =	3,40
Treillis.....	(6m,1+6,2)0,40	
Entretoises.....	4,2×0,42	×2 = 13,36
Goussets *a*.....	2×0,80×0,89 =	1,28
— *b*.....	4×2,00×0,65 =	5,20
Total.....		30,54

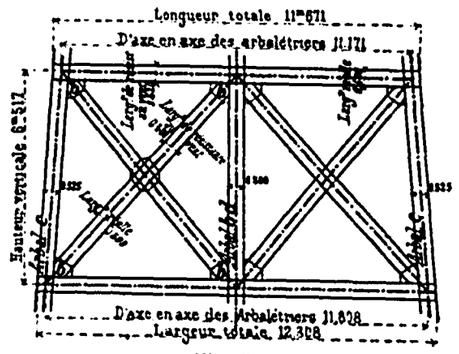


Fig. 91.

Surface pleine du panneau..... $6,571\times\frac{12,308+11,671}{2} = 78^{m2}$.

Rapport du vide au plein..... $\frac{78-30,54}{78,00} = 0,61$.

2me *Face*..... $30,54\times0,61 = 18^{m2},70$.

Escaliers..... $0,80\times6,51\times0,61 = 3,2$.

Ascenseur Edoux..... $(1,20+0,80+0,30)\times6,51\times0,61 = 9,10$

Surface totale du panneau 26 ... $30,54+18,70+3,20+9,10 = 61^{m2},54$.

Soit par mètre courant $\frac{61,54}{6,51} = 9,50$.

Nous l'admettons pour les panneaux 20 *à* 28.

Surfaces des panneaux 20 à 28.

NUMÉROS DES PANNEAUX.	HAUTEUR h DES PANNEAUX.	SURFACES DE RÉSISTANCE AU VENT $9{,}5 \times h$.	NUMÉROS DES PANNEAUX.	HAUTEUR h DES PANNEAUX.	SURFACES DE RÉSISTANCE AU VENT $9{,}5 \times h$.
		m²			m²
20	9,086	86,32	Report..	»	387,51
21	8,597	81,67	25	6,888	65,44
22	8,133	77,26	26	6,517	61,91
23	7,695	73,10	27	6,166	58,58
24	7,280	69,16	28	5,831	55,42
	A reporter.	387,51		Total....	628,86

Surface du panneau 19.

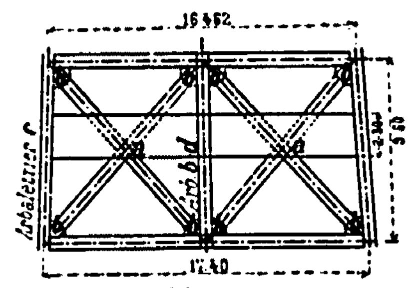


Fig. 92.

1re *Face* : m²
2 arbalétriers c... $2 \times 9{,}7 \times 0{,}54 = 10{,}50$
1 » *bd*.. $9{,}65 \times 0{,}50 = 4{,}82$
Treillis :
$\left.\begin{matrix}(10{,}50 + 10{,}80) \times 0{,}40 \\ 6{,}6 \times 0{,}42\end{matrix}\right\} \times 2 = 22{,}60$
Goussets *a*.. $2 \times 0{,}80 \times 0{,}80 = 1{,}28$
» *b*.. $4 \times 2{,}00 \times 0{,}70 = 5{,}60$
Total....... 44,8

Surface pleine du panneau........ $17{,}50 \times 9{,}60 = 168^{m^2},00$

Rapport des vides aux pleins...... $\dfrac{168 - 44{,}8}{168} = 0{,}73$

2me *Face*. — $44{,}8 \times 0{,}73 = 32^{m^2},60$ .... $32^{m^2},60$

Surface totale des deux faces.................................... $77^{m^2},40$

Soit par mètre courant $\dfrac{77{,}40}{9{,}60} = 8^{m^2},06$.

Nous avons de plus :
Escaliers.................. $0^{m},80$
Montants Edoux............ $1{,}20 + 2 \times 0{,}80 = 2{,}80$ } $4^{m^2},56$
Cylindres et gaines.......... $4 \times 0{,}40 \times 0{,}60 = 0{,}96$

Ces $4^{m^2},56$ donnent $4{,}56 \times 0{,}73 = 3^{m^2},35$ de surface au vent.
Surface totale par mètre courant....... $8{,}06 + 3{,}35 = 11^{m^2},41$

On ne la compte que sur $9{,}60 - 2{,}30 = 7^{m},30$ car le plancher est plein.
Surface du panneau 19........ $7{,}30 \times 11{,}41 = 83$ mètres carrés.
Plancher intermédiaire........ $16 \times 2{,}30 = 37$ »
Surface totale du panneau 19.. 120 »

Surfaces offertes au vent dans les panneaux de 13 à 18.

On calcule la surface par mètre courant dans le panneau 13, celle dans le panneau 19 (plancher déduit) nous est connue. Nous supposons que la surface par mètre courant varie en ligne droite entre ces deux panneaux.

Surface du panneau 13.

m²
1re *Face*. — Arbalétriers............... $2 \times 10{,}90 \times 0{,}55 = 12{,}00$
» .... $2 \times 10{,}75 \times 0{,}50 = 10{,}75$
Treillis.................... $2 \times 12{,}00$
» .... $2 \times 10{,}70$ } $\times 0{,}40 = 26{,}32$
» .... $2 \times 10{,}20$
Entretoises................. $2 \times 7{,}65$
» .... $1 \times 6{,}10$ } $\times 0{,}42 = 9{,}00$
Goussets................... $3 \times 0{,}80 \times 0{,}80$
» .... $4 \times 2{,}20 \times 0{,}75$ } $= 11{,}57$
» .... $2 \times 2{,}20 \times 0{,}69$
Surface de la 1re face........................ $69^{m^2},64$

Surface pleine du panneau................. $10{,}70 \times 27{,}80 = 297$

Rapport des vides aux pleins................ $\dfrac{297 - 69{,}64}{297} = 0{,}76$

2me *Face*................................ $69{,}64 \times 0{,}76 = 53$

Surface des deux faces..................... $69{,}64 + 53 = 122^{m^2},64$

» par mètre courant................ $\dfrac{122{,}64}{10{,}7} = 11^{m^2},5$

De plus les ascenseurs et les escaliers donnent par mètre courant la même surface que dans le panneau 19, soit 3,35.

Surface par mètre courant du panneau 13...... $11{,}5 + 3{,}35 = 14{,}85$

Surface des panneaux 14, 15, 16, 17 et 18.

$$S = 11^{m^2},41 + \left(\frac{14{,}85 - 11{,}41}{61{,}75}\right) h.$$

h représente la hauteur du milieu du panneau 19 au-dessus du milieu du panneau considéré.

NUMÉROS DES PANNEAUX.	HAUTEUR DES PANNEAUX.	HAUTEUR h AU-DESSOUS DU PANNEAU 19.	SURFACE PAR MÈTRE COURANT $S = 11{,}41 + \left(\frac{14{,}85 - 11{,}41}{61{,}75}\right) h$	SURFACE TOTALE DES PANNEAUX.
			m²	m²
18	10,00	9,80	11,96	119,6
17	10,00	19,80	12,51	125,1
16	10,50	30,05	13,08	137,34
15	10,50	40,55	13,66	143,43
14	10,60	51,10	14,26	151,16
13	10,70	61,75	14,85	158,90
			Total.........	835,53

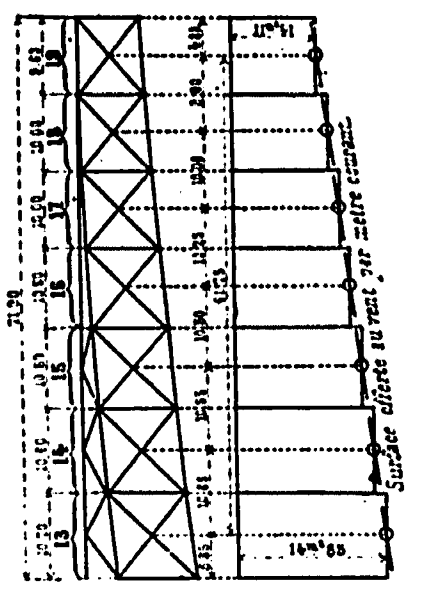


Fig. 93.

Surface du panneau 12.

m²
1re *Face*. — Arbalétriers............... $2 \times 11{,}50 \times 0{,}75 = 17{,}30$
» .... $2 \times 11{,}40 \times 0{,}75 = 17{,}10$
Treillis.................. $2 \times 12{,}60$
» .... $2 \times 11{,}00$ } $\times 0{,}40 = 28{,}5$
» .... $2 \times 12{,}00$
Entretoises................ $2 \times 8{,}20$
» .... $1 \times 8{,}00$ } $\times 0{,}42 = 10{,}20$
Goussets.................. $3 \times 0{,}80 \times 0{,}80$
» .... $4 \times 2{,}20 \times 0{,}75$ } $= 11{,}57$
» .... $2 \times 2{,}20 \times 0{,}69$
Surface de la 1re face......................... 84,67

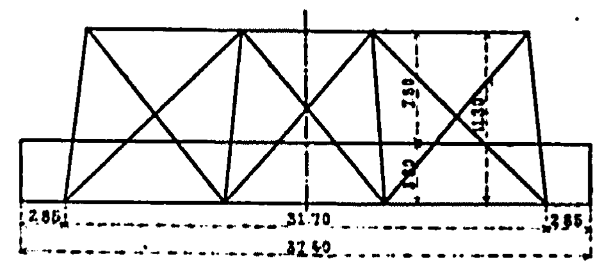


Fig. 94.

Surface pleine du panneau .... $11{,}30 \times 30{,}69 = 343^{m^2}$.

Rapport des vides au plein........ $\dfrac{343 - 84{,}67}{343} = 0{,}75$.

2me *Face*....................... $84{,}67 \times 0{,}75 = 63^{m^2},50$.

Surface des deux faces........... $84{,}67 + 63{,}5 = 148^{m^2},17$.

» par mètre courant......... $\dfrac{148{,}17}{11{,}30} = 13^{m^2},10$.

A ajouter : Ascenseurs Edoux...... $3^{m^2},35$.
Poutres d'ascenseurs... $4 \times 2^{m^2} \times 0{,}75 = 6^{m^2}$.

Surface totale par mètre courant... $13{,}10 + 3{,}35 + 6 = 22^{m^2},45$

La partie inférieure est comptée pleine sur $3^{m},80$ de hauteur.

On a donc..................... $(11{,}30 - 3{,}80) \times 22{,}45 = 168$
Galeries...................... $3{,}80 \times 37{,}40 = 142$
Surface totale du panneau 12..... 310^{m^2}.

Surface du panneau 11.

Ce panneau est plein, sa surface est donc :

$\dfrac{37{,}20 + 35{,}00}{2} \times 4{,}90 = 177$ mètres carrés.

Surface du panneau. 177 mètres carrés.

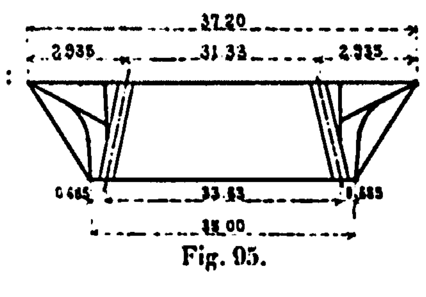


Fig. 95.

Surface du panneau 10.

m²
Partie supérieure. — Arbalétriers.. .... $4 \times 6{,}00 \times 0{,}88 = 21{,}10$
Goussets sous les arbalétriers. $12 \times 1{,}20 \times 0{,}80 = 11{,}40$
» treillis........... $6 \times 1{,}80 \times 0{,}80 = 8{,}60$
» croisements...... $6 \times 0{,}80 \times 0{,}80 = 3{,}80$
Treillis $[4(4{,}80 + 5{,}80 + 2(6{,}60 + 6{,}00)] \times 0{,}42 = 28{,}50$
Montants .... $3 \times 4{,}70 \times 0{,}42 = 5{,}90$

1° Surface totale (partie supérieure) $= 70{,}30$

La surface pleine est..... $\frac{34,51+37,55}{2}\times 6^m = 216^{m2},20$.

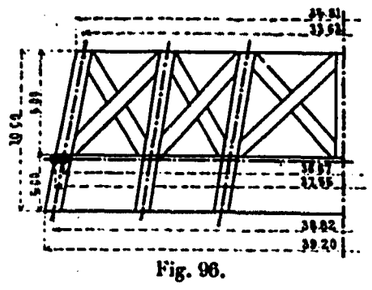


Fig. 96.

Rapport des vides au plein..... $\frac{216,20-79,30}{216,20}=0,63$.

Poutres d'ascenseurs et escaliers.

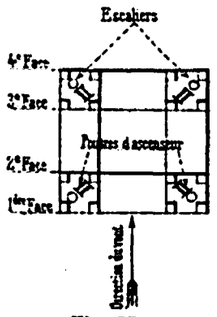


Fig. 97.

	m²
2° Ascenseurs et escaliers entre la 1re et la 2me face...	$6^m\times 4^{m2}\times 0,63 = 15,10$
3° Pour la 2me face.....	$79^{m2},30\times 0,63 = 50,00$
4° Pour la 3me face.....	$79,30\times 0,63\times 0,63 = 31,50$
5° Ascenseurs et escaliers entre la 3me et la 4me face..	$6\times 4\times \overline{0,63}^2 = 6,00$
6° Pour la 4me face.....	$79,30\times \overline{0,63}^3 = 19,80$

Surface totale de la partie supérieure :
$79,30+15,10+50+31,50+6+19,80 = 201^{m2},70$.

Surface de la partie inférieure.

Surface pleine.... $\frac{37,55+39,20}{2}\times 4,00 = 153^{m2},50$

Surface totale du panneau 10.... $201,70+153,50 = 355^{m2},20$

Surfaces offertes au vent dans les panneaux 6, 7, 8, 9.

Calculons les surfaces à compter par mètre courant pour les entretoises et les treillis.

1re *Face.* — Panneau moyen de $0^m,900$.

	m²
2 corn. de $80\times 80\times 9$.....	$2\times 0,08\times 0,09 = 0,144$
2 barres de treillis.....	$2\times 0,045\times 1,02 = 0,092$
Total.....	0,236

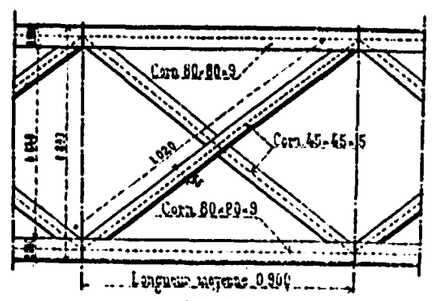


Fig. 98.

Surface pleine du panneau.....	$0,80\times 0,90 = 0,72$
» des vides du panneau.....	$0,72-0,236 = 0,484$
Rapport des vides au plein.....	$\frac{0,484}{0,72}=0,67$
Surface par mètre courant de la 1re face.....	$\frac{0,236}{0,900}=0,263$
» » » 2e face.....	$0,263\times 0,67 = 0,176$
Surface totale par mètre courant....	$0,263+0,176 = 0,44$

Surfaces du panneau 8.

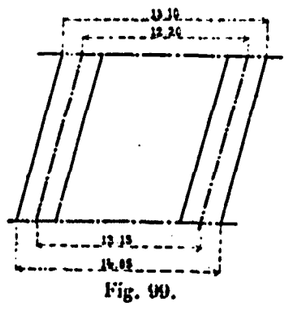


Fig. 99.

a) 1re Face :	
Arbalétriers..... .	$4\times 11\times 0,90 = 39,60$
Goussets.....	$8\times 1,40\times 0,95 = 10,60$
Goussets de croisement.....	$2\times 1,50\times 1,50 = 4,50$
Treillis.....	$2\times 14,00\times 0,44 = 12,30$
»	$2\times 11,00\times 0,44 = 9,70$
Entretoise.....	$1\times 10,00\times 0,44 = 4,40$
Montant intermédiaire.....	$2\times 10\times 0,44 = 8,80$
» Surface de la 1re face.....	89,9

Surface pleine..... $2\times\frac{13,10+14,05}{2} = 298^{m2},60$

Rapport du vide au plein..... $\frac{298,60-89,90}{298,60}=0,70$

b) Pour les ascenseurs et les escaliers..... $11\times 4\times 0,70 = 30^{m2},80$

c) Pour la 2e face.... $89,90\times 0,70 = 62\ ,00$

Surface totale des 2 premières faces :
$81,90+30,8+62,90 = 183,60$

L'écartement des 2e et 3e faces étant considérable, nous comptons pour les 3e et 4e faces autant que pour les 1re et 2e.

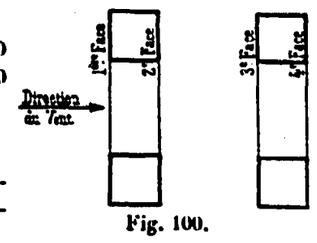


Fig. 100.

Surface totale du panneau 8..... $2\times 183,60 = 367,20$

Surface des panneaux 7 et 9.

Panneau 9.

$\frac{367,20\times 10,20}{11} = 340^{m2}$.

Panneau 7.

Comme le panneau 8... $367^{m2},20$

Surface du panneau 6.

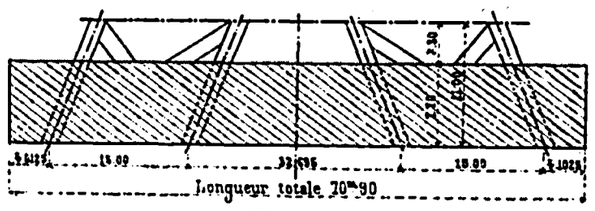


Fig. 101.

a) Partie inférieure..... .	$7,70\times 70,90 = 545^{m2},90$
b) » supérieure.....	$\frac{367,20\times 3,30}{11} = 110\ ,20$
Surface totale.....	$656^{m2},10$

Surface du panneau 5.

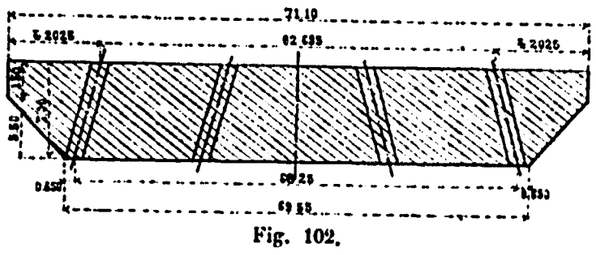


Fig. 102.

$(71,10\times 1,50)+\frac{(71,10+69,55)}{2}5,50 = 493^{m2},50$

Surface du panneau 4.

Dans ce panneau, les poutres décoratives et le masque qui est devant le montant ne laissent que peu de vides, aussi comptons-nous la surface du panneau comme entièrement pleine.

Elle a pour valeur :
$\frac{69,37+80,53}{2}\times 11 = 823^{m2},00$

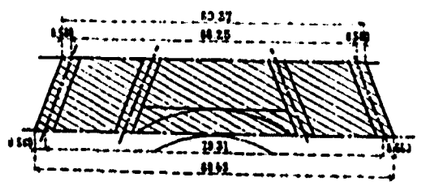


Fig. 103.

Surface du panneau 3.

Trapèze..... ... $ABB'A' = \frac{80,43\times 91,49}{2}\times 11 = 967,60$

Segment..... $\frac{2}{3}\times(54,37\times 11) = 398,70$

Reste..... 568,90

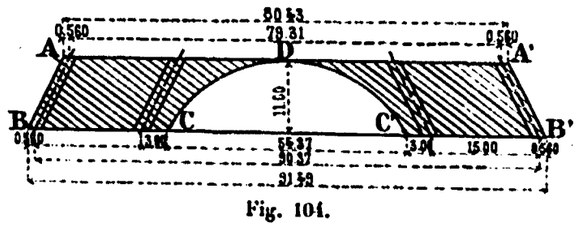


Fig. 104.

Pour 2 faces semblables..... $568,90\times 2 = 1.137^{m2},80$

Surfaces des panneaux 2 et 1.

Panneau 2.

Surface pleine d'un montant :

$\frac{18,56+16,90}{2} \times 11,00 = 195^{m2},00.$

Soit pour 4 montants.

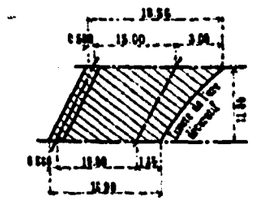


Fig. 105.

Surface du panneau 2 :
$4 \times 195 = 780^{m2}$

Panneau 1.

Surface pleine d'un montant :

$\frac{16,90+19,80}{2} \times 11,00 = 201^{m2},85$

Soit pour 4 montants.

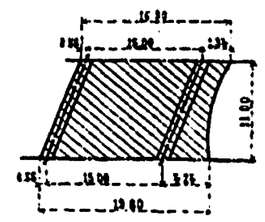


Fig. 106.

Surface du panneau 1 :
$201,85 \times 4 = 807^{m2},4$

Tableau des surfaces des éléments 0 à 28.

NUMÉROS DES ÉLÉMENTS.	DÉTERMINATION DES SURFACES DES ÉLÉMENTS.	SURFACES DES ÉLÉMENTS.
		m².
0.....	Panneau 29 et campanile	315,5
1.....	» 28 + 1/2 panneau 27 = $55,42 + \frac{58^{m2},58}{2}$	84,71
2.....	1/2 » 27 + 1/2 » 26 = $\frac{58,58+61,91}{2}$	60,24
3.....	1/2 » 26 + 1/2 » 25 = $\frac{61,91+65,44}{2}$	63,68
4.....	1/2 » 25 + 1/2 » 24 = $\frac{65,44+69,16}{2}$	67,30
5.....	1/2 » 24 + 1/2 » 23 = $\frac{69,16+73,10}{2}$	71,13
6.....	1/2 » 23 + 1/2 » 22 = $\frac{73,10+77,26}{2}$	75,18
7.....	1/2 » 22 + 1/2 » 21 = $\frac{77,26+81,67}{2}$	79,46
8.....	1/2 » 21 + 1/2 » 20 = $\frac{81,67+86,32}{2}$	84,00
	A reporter.....	901,20

NUMÉROS DES ÉLÉMENTS.	DÉTERMINATION DES SURFACES DES ÉLÉMENTS.	SURFACES DES ÉLÉMENTS.
		m².
	Report.....	901,20
9.....	1/2 » 20 + 1/2 » 19 = $\frac{86,32+120}{2}$	103,16
10.....	1/2 » 19 + 1/2 » 18 = $\frac{120+119,6}{2}$	119,80
11.....	1/2 » 18 + 1/2 » 17 = $\frac{119,6+125,1}{2}$	122,35
12.....	1/2 » 17 + 1/2 » 16 = $\frac{125,1+137.34}{2}$	131,22
13.....	1/2 » 16 + 1/2 » 15 = $\frac{137,34+143,43}{2}$	140,38
14.....	1/2 » 15 + 1/2 » 14 = $\frac{143,43+151,16}{2}$	147,30
15.....	1/2 » 14 + 1/2 » 13 = $\frac{151,16+158,9}{2}$	155,03
16.....	1/2 » 13 + 1/2 » 12 = $\frac{158,9+310}{2}$	234,45
17.....	1/2 » 12 + 1/2 » 11 = $\frac{310+177}{2}$	243,50
18.....	1/2 » 11 + 1/2 » 10 = $\frac{177+355}{2}$	266,10
19.....	1/2 » 10 + 1/2 » 9 = $\frac{355+340}{2}$	347,60
20.....	1/2 » 9 + 1/2 » 8 = $\frac{340+367,2}{2}$	353,60
21.....	1/2 » 8 + 1/2 » 7 = $\frac{367,2+367,2}{2}$	367,20
22.....	1/2 » 7 + 1/2 » 6 = $\frac{367,2+656,1}{2}$	511,65
23.....	1/2 » 6 + 1/2 » 5 = $\frac{656,1+493,1}{2}$	574,80
24.....	1/2 » 5 + 1/2 » 4 = $\frac{493,1+823,9}{2}$	658,70
25.....	1/2 » 4 + 1/2 » 3 = $\frac{823,9+1.137,8}{2}$	980,85
26.....	1/2 » 3 + 1/2 » 2 = $\frac{1.137,8+780}{2}$	958,90
27.....	1/2 » 2 + 1/2 » 1 = $\frac{780+807,4}{2}$	793,70
28.....	1/2 » 1 » $\frac{807,4}{2}$	403,70
	Total.....	8.515,19

CHAPITRE VIII

DESCRIPTION DE L'OSSATURE

§ 1. — Appuis des arbalétriers.

Les arbalétriers en fer reposent sur les pierres de taille du couronnement par des appuis en fonte et en acier moulé. Il avait paru nécessaire de constituer ces appuis de telle sorte qu'ils pussent laisser une certaine latitude dans la fixation du niveau inférieur des arbalétriers; il était en effet presque impossible de les régler d'une manière absolue dans la position prévue, et de plus on pouvait être conduit à modifier cette position dans le cas d'un tassement dans les maçonneries ou le sol.

Cet appui (voir pl. VI, fig. 7 à 16) est donc fait en deux parties ayant l'une par rapport à l'autre une certaine mobilité.

La partie inférieure est un sabot en fonte ayant une base à peu près carrée de 1,80 *m* de côté à travers les trous de laquelle passent les deux grands boulons d'ancrage noyés au centre de chaque massif. Cette base est surmontée par une partie carrée dont les parois de 100 *mm* d'épaisseur laissent entre elles un vide de 0,783 *m* de côté. La hauteur totale de ce sabot est de 0,915 *m*

Le sabot supérieur ou contre-sabot est en acier moulé; le bas pénètre en partie dans le vide du sabot inférieur; les faces latérales du haut s'emboîtent exactement dans l'intérieur du losange formé par chaque arbalétrier. Ceux-ci reposent par leur tranche dressée avec soin sur une saillie ménagée sur le pourtour de la partie moyenne. C'est au-dessous de cette saillie qu'on interpose des cales en fer d'épaisseur convenable par lesquelles se fait l'appui sur le rebord du sabot inférieur.

Les tirants d'ancrage s'attachent à l'extérieur de l'arbalétrier à l'aide d'un étrier en fer forgé de 20 *mm* d'épaisseur, rivé sur des goussets saillants portés par l'arbalétrier. Leur écrou s'appuie sur cet étrier par une rondelle en acier de 0,10 *m* de hauteur, épousant aussi complètement que possible le vide laissé entre les goussets.

Pour rendre possible l'introduction des cales entre le contre-sabot et le sabot inférieur, on avait ménagé à l'intérieur de ce dernier un vide suffisant pour y loger un vérin hydraulique puissant, capable de développer un effort de 800.000 kilos.

§ 2. — Montants jusqu'au premier étage.

Les arbalétriers formant les arêtes de chacun des montants ont une section horizontale carrée de 0,800 *m* de côté à l'intérieur, représentée dans la planche XXXI, section XXVIII à XXV. L'obliquité de leur axe par rapport à l'horizontale est de 54°,35',26" suivant la ligne de plus grande pente, c'est-à-dire suivant la diagonale du carré de la base de la Tour, de 65°,48',48" dans le plan rabattu de la face et enfin de 63°,18',43" dans le plan vertical (pl. IX, fig. 5). En raison de cette obliquité, la coupe normale à leur axe n'est plus un carré mais un losange, représenté figure 8, dont les faces sont inclinées de 78°,21',44" l'une par rapport à l'autre.

Les quatre sections carrées sont disposées au sommet d'un carré de 15,00 *m* de côté. Les arbalétriers portent les lettres *a*, *b*, *c*, *d*, la lettre *a* désignant l'arêtier le plus voisin de l'axe de la Tour, les autres lettres se rapportent dans leur ordre aux arêtiers rencontrés en tournant autour de l'axe du montant dans le sens des aiguilles d'une montre, de telle sorte que les arbalétriers portant les mêmes lettres sont égaux ou symétriques. D'une manière générale, les montants à l'extrémité d'une même diagonale, tels que 2 et 4, 1 et 3, sont égaux sauf la position de certains goussets d'attache, et ils sont symétriques par rapport à ceux qui leur sont voisins suivant les côtés du carré de la base. Les faces elles-mêmes de ces arbalétriers sont en général différentes et portent les numéros 1 à 16 (voir pl. IX, fig. 1).

La section horizontale de la partie inférieure (section XXVIII, arbalétrier a) est un carré dont les côtés ont 877 *mm* mesurés extérieurement. Ils sont formés par deux tôles jointives de 400 *mm* de largeur sur 18,5 *mm* d'épaisseur, réunies par un couvre-joint longitudinal de 200 × 12 et par deux cornières de 100 × 100 × 12. La liaison des quatre tôles est faite par quatre cornières d'angle de 100 × 100 × 12. La surface de cet arbalétrier est de 95.992 mm^2 donnant un poids de 748 *k* le mètre courant. Les autres arbalétriers de cette section sont disposés de même et diffèrent seulement du premier par l'épaisseur des tôles, laquelle se réduit à 17 *mm* pour les arbalétriers *b* et *d* et à 16 *mm* pour l'arbalétrier *c*. Les calculs qui précèdent donnent la raison de ces différences et montrent que, d'une manière générale, l'arbalétrier intérieur est celui qui supporte le plus grand effort, l'extérieur, celui qui supporte le moindre et que les deux latéraux travaillent également et à un effort intermédiaire. Leur section est de 91.192 mm^2 donnant un poids de 711 *k* le mètre courant pour les arbalétriers *b* et *d*, et 87.992 mm^2 donnant un poids de 686 *k* le mètre courant pour l'arbalétrier *c*.

L'ensemble donne une section de 366.368 mm^2 représentant un poids par mètre courant de 2.856 *k*. La position des rivures des tôles sur les cornières d'angle a été déterminée de manière à ce que la dimension extérieure du tronçon restât constante.

La hauteur des panneaux d'un montant, c'est-à-dire la distance de deux entretoises horizontales réunies par une croix de Saint-André est de 11,00 *m* en projection sur le plan vertical (pl. VIII, fig. 8) et de 12,31 *m* suivant le plan des faces (pl. IX, fig. 8). La longueur d'arbalétrier comprise entre les axes des entretoises est en nombre rond de 13,50 *m* et a été divisée en trois parties de 4,50 *m* en nombre rond, laquelle est la longueur de chacun des tronçons. Cette longueur n'avait pas été prise plus importante, afin que le poids de chacun des tronçons, qui est de 700 *k* environ par mètre courant, ne dépassât pas sensiblement la limite de 3.000 *k* que l'on s'était fixée pour la facilité du montage.

Par l'adoption de cette longueur, il existe trois joints dans chaque panneau; celui du milieu correspond à l'entretoise intermédiaire, laquelle ne transmet pas d'effort et constitue simplement une entretoise d'écartement; les deux autres sont à des distances égales de l'entretoise principale, de sorte que la transmission des efforts qui s'opère par celle-ci et par les deux barres de treillis qui s'y attachent, se fait ainsi sur le milieu même d'un tronçon et dans de meilleures conditions pour la facilité de l'assemblage que si en ce nœud on rencontrait un joint.

Quant au joint lui-même, toutes les pièces qui constituent le tronçon viennent s'arrêter dans un même plan normal à l'axe : toutes les tranches des fers qui doivent venir buter l'une contre l'autre en contact parfait sont dressées avec le plus grand soin, mais en outre, bien entendu, les joints sont recouverts par des couvre-joints, dont les sections, ainsi que celles des rivets d'attache, sont toujours au moins égales à celles des arbalétriers (voir pl. IX, fig. 21 à 26).

Des cadres d'entretoisement placés tous les deux mètres environ assurent l'indéformabilité du caisson : ils sont formés par des cornières pinçant des goussets triangulaires (pl. IX, fig. 28) laissant entre eux un espace suffisant pour le passage d'un homme. Cette possibilité de circulation sur toute la longueur d'un arbalétrier a été jugée indispensable pour l'entretien et le renouvellement de la peinture à l'intérieur ainsi que pour tout remplacement de rivets, si cela était nécessaire. Enfin un trou d'homme de 0,50 × 0,345 *m* est ménagé au droit de chacun des joints dans l'une des faces; il permet d'effectuer la rivure en livrant passage à un teneur de tas qui pénètre dans l'intérieur du caisson.

Les tronçons portent en outre rivés sur les cornières les goussets découpés qui servent à l'attache des entretoises et des treillis (pl. IX, fig. 10 à 17).

Les tronçons d'arbalétriers des quatre premiers panneaux sont analogues à ceux que nous venons de décrire et ne diffèrent que par l'épaisseur des tôles, qui varie de 17 *mm* à 13,5 *mm* ainsi que l'indique la planche XXXI, à laquelle nous nous reportons. Leur section varie peu, soit de 366.368 à 334.368 mm^2, c'est-à-dire de 2.856 *k* à 2.608 *k* par mètre courant.

Les entretoises courantes, au nombre de trois par face, sont construites suivant une forme qui se retrouvera dans un grand nombre des parties de la Tour et que nous avons adoptée parce qu'elle n'exige pour une grande rigidité qu'une quantité de métal relativement faible et que, qualité très importante, les pièces ainsi formées travaillent aussi bien à la compression qu'à la traction. C'est celle d'un caisson de grande section formé par quatre cornières reliées dans leurs quatre faces par d'autres cornières disposées alternativement à 45°. Ces entretoises sont représentées planche IX, fig. 31 et 32.

Le caisson a sensiblement la même dimension que l'arbalétrier, c'est-à-dire 800 *mm* de hauteur et une largeur sensiblement égale : les cornières qui le composent sont des cornières de 80 × 80 × 10 reliées par des cornières de 45 × 45 × 5 disposées pour des raisons d'aspect en treillis double dans les plans verticaux et en treillis simple dans les plans horizontaux (voir fig. 8 de la planche IX). L'attache de ces cornières est indiquée dans la figure 27 de cette même planche.

Ces entretoises, dont l'aile est en saillie extérieurement, viennent s'assembler extérieurement par le plat de leurs faces verticales de cornières sur les grands goussets découpés de 8 *mm* d'épaisseur rivés sur les tronçons. Elles sont interrompues dans leur milieu pour le passage d'un lien longitudinal placé dans l'axe de la face et ayant la même section : les saillies des cornières sont également extérieures, et la liaison se fait sur un gousset évidé en forme d'étoile (voir fig. 8, 18 et 29, pl. IX).

Entre les entretoises principales délimitant le panneau, sont disposées les entretoises intermédiaires d'écartement (fig. 8 et 19) lesquelles sont identiques aux premières comme section.

Il en est de même pour les treillis disposés en croix de Saint-André et venant se

croiser avec l'entretoise intermédiaire du panneau; mais pour ceux-ci, dont les sections sont formées par des cornières variables (voir pl. XXXI) de 80×80 à 90×90 et 100×100, ces dernières ont leur aile en saillie intérieurement et viennent s'attacher sur les faces intérieures des goussets découpés. Les rencontres se font sur un gousset central (fig. 20, pl. IX); l'une des barres de treillis est continue et l'autre interrompue. Le lien longitudinal dans l'axe est continu; l'entretoise horizontale est interrompue.

A la partie inférieure, il était nécessaire pour assurer d'une façon complète l'écartement et l'inclinaison des premiers tronçons et constituer une base absolument indéformable, d'établir des entretoises d'une grande hauteur formant de véritables poutres. Ces poutres ont dans les faces extérieures (pl. VII, fig. 1 et 5) une hauteur de 3,387 *m* laquelle se réduit à 2,00 *m* dans les faces intérieures afin de donner aux portes d'accès dans les piliers une hauteur suffisante. Ces poutres sont à double paroi et sont représentées pl. X, fig. 1 à 11; leurs membrures supérieures et inférieures sont formées par un fer plat de 200×9 armé par une cornière de 80×80×10. Le treillis double qui les réunit est formé par des cornières de 70×70×8 (voir attache fig. 2) réunies elles-mêmes d'une paroi à l'autre par des plats de 55×7 (voir fig. 3 et 8). La liaison des parois est assurée par un treillis en N de cornières de 45×45×5.

Toutes les parois des montants sont si rigides et sont reliées soit au niveau des appuis, soit à celui du premier étage par des ceintures si puissantes, qu'il est inutile d'entretoiser la Tour dans les divers plans horizontaux. Cela, du reste, n'eût pas été possible en raison de la nécessité de livrer passage aux ascenseurs. On put néanmoins, sans inconvénient à ce point de vue, disposer au niveau de chaque panneau une entretoise diagonale E réunissant les arbalétriers *b* et *d* (voir pl. IX, fig. 30); cela a été fait en vue principalement des facilités du montage et aussi pour servir d'attache aux poutres de l'escalier.

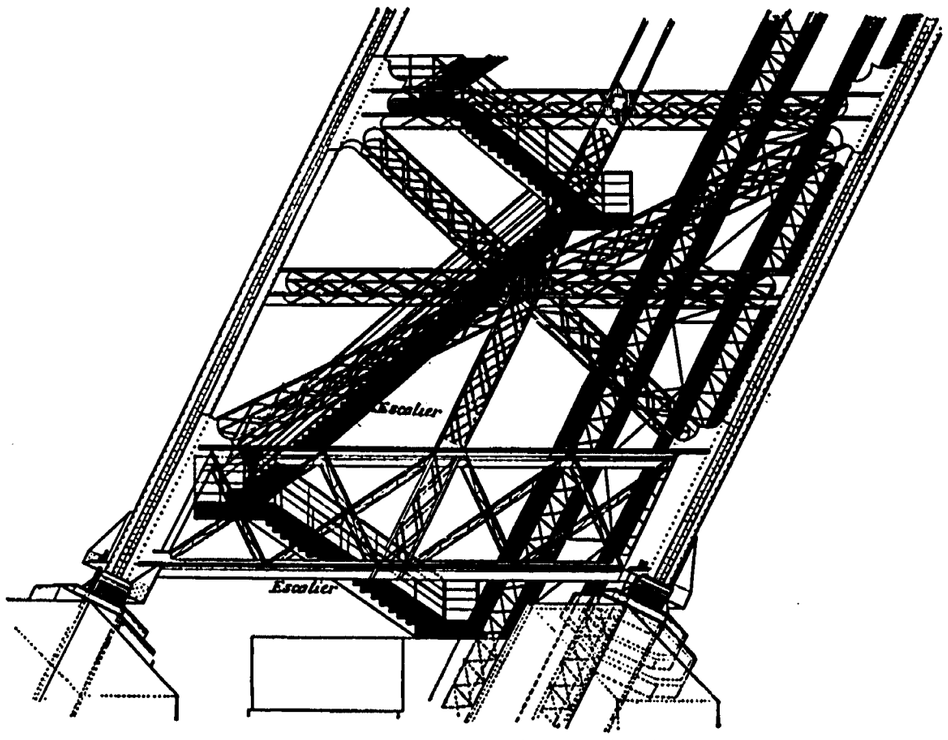


Fig. 107. — Ensemble de la partie inférieure.

Cette entretoise a une longueur très grande, 21,21 *m*, par rapport à sa hauteur qui, comme les autres pièces constitutives du montant, ne doivent pas avoir plus de 800 *mm* (voir fig. 37); aussi a-t-on été obligé de lui donner une forme spéciale. Elle comporte, dans sa coupe transversale (voir fig. 34) au centre, une poutre verticale de 0,715 *m* de hauteur formée par 4 cornières de 80×80×10 réunies par un treillis en cornières de 50×50×6. Sur ces cornières vient se fixer une cage en losange, dont les angles sont constitués par deux cornières longitudinales de 80 supportant un quadruple réseau en N de cornières de 50×50×6 qui viennent s'emboutir soit sur les faces horizontales des cornières de la poutre, soit sur les faces verticales des cornières d'angle. L'ensemble de cette poutre est pris entre deux goussets horizontaux qui s'attachent eux-mêmes sur les goussets des entretoises horizontales des panneaux (voir fig. 40).

§ 3. — Panneau 5 et poutres du premier étage.

Au niveau du panneau 5, dont la hauteur suivant le plan vertical est de 7,00 *m* et la hauteur verticale en rabattement de 7,53 *m*, règnent les grandes poutres formant la première ceinture d'entretoisement des montants (pl. VII, fig. 1 et pl. VIII, fig. 8). Elles sont en outre destinées à porter la plate-forme sur laquelle sont installés les restaurants et les galeries de pourtour.

a) *Ensemble.* — L'ensemble de cette ossature est représenté dans la planche XVI, fig. 7 et 8. Les arbalétriers sont réunis de l'un à l'autre montant par de grandes poutres en treillis intérieures et extérieures de 7,53 *m* de hauteur situées dans le plan des faces (fig. 9) et réunies à leur partie supérieure par des poutres transversales de 4,00 *m* de hauteur espacées de 3,882 *m*. C'est sur ces poutres transversales que repose le solivage formant le plancher des restaurants.

Ces poutres, fortement contreventées par des pièces diagonales, ont une longueur de 38,25 *m* à la partie inférieure et de 32,70 *m* à la partie supérieure (fig. 6). C'est sur celles-ci que sont fixées les consoles supportant la galerie de circulation et les balcons intérieurs (fig. 11).

Le treillis du panneau 5, qui lui forme suite, est disposé non plus en forme de croix de Saint-André, mais en treillis multiple dont les barres ont sensiblement la même inclinaison que celles des poutres (voir fig. 6).

Enfin, dans le vide du montant sont disposées à angle droit deux poutres principales, *e*, *f* (fig. 9), supportant des consoles en porte à faux destinées à ménager le vide de l'ascenseur (voir aussi pl. VIII, fig. 2); ces consoles sont maintenues par des poutres placées dans leur prolongement et venant se fixer sur les faces extérieures du montant. Dans l'axe de ces mêmes poutres, sont placées les consoles de la galerie de pourtour régnant sur les faces extérieures.

Cet ensemble étant ainsi sommairement décrit, nous allons entrer dans quelques détails sur la construction.

b) *Panneau 5.* — Les arbalétriers qui le composent ne sont plus en prolongement de ceux des panneaux inférieurs; en bas de ce panneau existe un coude assez prononcé, 4° environ. Ils s'infléchissent dans le joint qui existe en ce point, de telle sorte que les axes forment un angle de 176°,3',20" (pl. X, fig. 19). La section de l'arbalétrier est celle portant le numéro XXIV dans la planche XXXI; elle est analogue à celle des arbalétriers inférieurs et de même dimension extérieure, soit 877 *mm* mesurés horizontalement. La section totale des montants est de 316.500 mm^2, soit 2.470 *kg* par mètre courant.

Le treillis de ce panneau est représenté dans la planche X, fig. 14 à 17. Il est formé par une poutre à double paroi dont les membrures inférieures et supérieures sont constituées par une âme de 500×10 raidie par une cornière de 100×100×12, placée intérieurement. Chacune de ces membrures vient s'appliquer sur les goussets des arbalétriers et reçoit un treillis disposé à 45°, formé par des cornières de 80×80×8 pinçant une âme de 120×6. Les deux parois sont réunies l'une à l'autre par un montant vertical à treillis représenté figure 16. Les poutres principales, *e* et *f*, sur lesquelles viennent s'assembler les consoles en porte à faux entourant le vide de l'ascenseur, ont une hauteur de 4,00 *m*. L'une d'elles, la poutre *e*, est représentée dans la planche XI, fig. 75.

c) *Grandes poutres.* — Les grandes poutres sont représentées dans la planche X, fig. 21 pour leurs détails et dans la planche XI, fig. 70 à 74 pour leur disposition d'ensemble.

Leurs membrures sont formées par des tôles de 800×12 armées par des cornières de 100 ouvertes ou fermées sur lesquelles sont rivées les semelles supérieures de 890 *mm* de largeur sur 48 *mm* d'épaisseur. La membrure inférieure qui se relie aux poutres décoratives de l'arc est représentée dans la planche XIII *bis*, fig. 62. Le treillis qui les réunit est disposé à 45° et comporte des barres formées par des semelles et des cornières, dont les dimensions sont indiquées dans la planche XXXIV, soit pour la poutre extérieure, soit pour l'intérieure. Les deux parois sont réunies par un solide montant vertical représenté planche X, fig. 22; son âme est en tôle pleine sur toute la hauteur des attaches des consoles ou de celles de la poutre transversale.

La liaison des grandes poutres intérieures et extérieures est faite par les entretoises transversales de 4,00 *m* de hauteur, représentées dans la planche XI, fig. 72; leur espacement est de 3,8825 *m*. Elles sont elles-mêmes entretoisées longitudinalement par des poutres de même hauteur (voir fig. 73) dans lesquelles un des panneaux a été réservé pour constituer un sous-sol avec plancher, représenté planche XVI, fig. 9.

Les solives en fer double T de 160, espacées de 0,65 *m*, reposent sur les entretoises transversales; leur intervalle est rempli par un hourdis en terre cuite (système Perrière); sur ce hourdis est appliquée une chape en ciment recevant les lambourdes. Ces lambourdes sont recouvertes par des madriers jointifs sur lesquels est étendu l'asphalte.

d) *Galeries.* — Le sol des galeries de pourtour n'a pas de hourdis Perrière; les lambourdes reposent sur les solives en fer. Il est placé à 1,23 *m* au-dessous de celui du premier étage, afin que les promeneurs des galeries ne gênent pas la vue des personnes installées dans les restaurants. De nombreux escaliers en bois permettent le passage de l'un à l'autre niveau.

Le plancher des galeries est supporté par des consoles triangulaires. Celles qui sont fixées sur les grandes poutres sont représentées dans la planche XVI, fig. 11; celles situées dans les montants sont représentées dans la planche XIII, fig. 2.

Ces consoles sont formées par une pièce horizontale (âme de 230×7 pincée par deux cornières de 70×70×7) supportée par une contrefiche formée par 4 cornières de 70. L'angle supérieur est maintenu par un gousset sur lequel vient s'appliquer la poutre sablière portant le chéneau (fig. 9), le garde-corps et les colonnes en fonte de la galerie.

Comme les nécessités de l'architecture exigeaient que toutes les poutres de ce panneau fussent recouvertes par une gorge pleine sur laquelle faisaient saillie des consoles ornementales, la contrefiche droite de la console de support s'appliqua sur une grande console en tôle pleine ayant toute la hauteur de la poutre en treillis. Sur le contour extérieur de celle-ci, on disposa une tôle de 3 *mm* de forme concave raidie par des cornières de 50 (fig. 1 et 2). La console d'angle faisant le raccord entre les faces perpendiculaires est représentée dans la figure 3.

Balcons intérieurs. — Les consoles du balcon intérieur sont portées par les poutres transversales des grandes poutres intérieures; elles sont représentées dans les figures 9 et 10 de la planche XVI. Leur saillie maximum est de 2,59 *m*.

§ 4. — Panneaux 6 à 10.

Au delà du premier étage, quatre panneaux portant les numéros 6 à 9, se suivent analogues à ceux du premier étage, c'est-à-dire que leurs arbalétriers sont de même forme et réunis par des entretoises horizontales et de grandes croix de Saint-André à treillis reliées par une poutre centrale. L'entretoise intermédiaire a été supprimée ainsi que l'entretoise transversale de contreventement. En raison de la rigidité des parois et de leur rapprochement du plan vertical, cette suppression ne présentait aucun inconvénient; elle était du reste exigée par la nécessité où l'on était de livrer passage aux ascenseurs. La hauteur de ces panneaux est de 11,00 *m* dans le plan vertical, sauf le dernier, qui n'a que 10,20 *m*. L'axe des arbalétriers s'infléchit au droit de chacune des entretoises et leur angle avec l'horizontale suivant le plan de la face, passe de 72°,49',50" à 76°,54',10" (pl. VII, fig. 1). Leur écartement diminue progressivement de 15,00 *m*, largeur au niveau du premier étage, à 11,32 *m* au-dessous de la première ceinture du deuxième étage. Leur section est représentée dans la planche XXXI (sections XXIII à XX); elle se compose simplement de quatre tôles jointives assemblées entre elles par des couvre-joints longitudinaux, et fixées sur des cornières d'angle de 100 × 100 × 12, sans addition de cornières de renfort.

Leur surface totale diminue notablement et passe de 252.704 *mm*², soit 1971 *kg* par mètre courant à 222.524 *mm*², soit 1735 *kg* par mètre courant. Les entretoises et les treillis sont des caissons identiques à ceux de l'étage inférieur. Le panneau 10, qui a une hauteur de 10,00 *m* en projection verticale, comprend une ceinture formée par des poutres à treillis serré de 3,00 *m* de hauteur d'axe en axe des membrures, et par des poutres en treillis largement espacés, de 6,56 *m* de hauteur (pl. VII, fig. 2), lesquelles sont représentées à l'échelle de 0,02 *m* par mètre dans la planche XII, figures 1, 2, 3 et 4.

Comme elles jouent principalement un rôle décoratif, elles sont constituées par des éléments de faible épaisseur, 5 *mm* en général; celle-ci est la plus faible à laquelle nous soyions descendus pour les tôles et fers plats des parties constitutives de la Tour. Les treillis, très rapprochés, sont formés par des âmes de 300 × 5 raidies par des cornières de 30 × 30 × 4, s'assemblant sur des âmes qui ont 0,60 *m* à la partie supérieure et 0,50 *m* à la partie inférieure. Les deux parois de chacune de ces poutres sont réunies par de légères cornières de 45 × 45 × 5, de manière à former des caissons.

Le panneau 11 correspond à la ceinture supérieure qui porte le plancher du deuxième étage.

§ 5. — Plancher du deuxième étage.

Ce plancher est représenté dans son ensemble planche XVI, figure 12. Les arbalétriers de chaque montant sont réunis deux à deux par des poutres A, B, C, D, représentées dans la planche XII, figures 1, 2 et 3. Ce sont des poutres en treillis à double paroi de 5,03 *m* de hauteur. Les membrures (une semelle de 300 × 12, deux âmes de 450 × 8 et 450 × 11, deux cornières ouverte et fermée de 100 × 100 × 12) sont reliées par des barres en double cornière de 80 × 80 × 8, venant se croiser sur un gousset central porté par un montant vertical à treillis.

Dans l'intervalle des montants sont disposées trois entretoises, F, de 1,50 *m* de hauteur, représentées dans la planche XVII, figure 37. Ces entretoises, formées en treillis, sont supportées du côté de la poutre C par une grande console complétant la hauteur du panneau.

Le montant lui-même doit donner passage à l'ascenseur et à l'escalier venant du premier étage. Les deux poutres métalliques G et H, qui limitent le vide de l'ascenseur, sont à âme pleine de 0,75 *m* de hauteur (pl. XVII, fig. 36) supportées par une console évidée pour le passage de l'escalier.

Les poutres en treillis I qui les réunissent aux poutres du pourtour, ont la même hauteur (fig. 41) et sont supportées par une grande console, comme les précédentes. Ces différentes consoles ont pour but d'équilibrer celles de la galerie extérieure.

Des contreventements sont placés à la partie supérieure des entretoises, qui reçoivent un solivage avec le hourdis Perrière.

Dans la partie centrale, qui doit recevoir les montants de l'ascenseur Edoux, est disposé un grand cadre rectangulaire formé par des poutres pleines de 2,00 *m* de hauteur (pl. XVI, fig. 12 et 13), O et P, R, T, reposant sur la semelle supérieure des poutres de pourtour.

Sur les poutres O, s'appuie une nouvelle poutre, S, représentée dans la figure 43 de la planche XVII. Enfin les poutres V, (pl. XVI, fig. 12 et 13), de 1,30 *m* de hauteur supportent les cylindres de l'ascenseur et viennent s'assembler sur la poutre R (pl. XVII, fig. 33).

Nous reviendrons sur le rôle de ces poutres lors de la description de l'ascenseur Edoux; nous nous contenterons, pour le moment, d'ajouter que le plancher sous la cabine est formé de moises jointives de 0,12 sur 0,25 *m* sur lesquelles est appliqué un parquet de 25 *mm* d'épaisseur.

Galerie. — Les poutres de pourtour reçoivent comme au premier étage les consoles supportant la galerie (pl. XIII *bis*, fig. 78). Ces consoles, de forme très simple, sont réunies par une sablière de 0,50 *m* de hauteur (fig. 67); leur saillie est de 2,76 *m* par rapport à l'axe des poutres porteuses. Elles portent un chêneau saillant (fig. 65) sur la sablière supérieure, et à un gousset inférieur attaché aux grandes poutres porteuses, se fixe une tôle courbée de 3 *mm* d'épaisseur formant corniche décorative, raidie par des cornières de 30 et portant, au droit de chaque montant, à des espacements de 3,362 *m*, une console pleine en saillie dans l'axe de laquelle est placé le pilier en fer de la galerie (pl. XIII *bis*, fig. 93 et 94).

§ 6. — Panneaux 12 à 29.

A partir du deuxième étage, l'ossature n'a plus que quatre faces au lieu de seize; les arbalétriers *a* de l'angle intérieur s'arrêtent au plancher de la deuxième plate-forme et les arbalétriers *b* et *d* se rapprochent dans une même face, pour se réunir entre les panneaux 17 et 18.

Jusqu'au panneau 17 (pl. XXXI, sections XII à XVII) le nombre des arbalétriers est de douze; leur section est un carré de 0,50 *m* de côté, se rapportant à deux types: l'un pour l'arête extérieure *c*, l'autre pour l'arbalétrier intermédiaire *b* ou *d*.

Au delà (sections I à XI), il ne subsiste plus que l'arêtier *c* qui prend la forme d'un angle droit, et l'arbalétrier intermédiaire *bd*, qui prend celle d'un simple T; les faces des uns et des autres ont une largeur de 500 *mm*.

Les surfaces de toutes ces sections sont données dans la même planche XXXI et varient comme section totale de 591.684 *mm*², soit 4.600 *kg* par mètre courant à 208.672 *mm*², soit 1.630 *kg* par mètre courant. Comme terme de comparaison, nous rappelons que la section totale moyenne dans le premier étage correspond à un poids de 11.000 *kg* et dans le deuxième étage de 7.200 *kg*.

Ces 17 panneaux, dont la hauteur totale est de 149,40 *m*, ont une hauteur partielle qui varie, suivant la verticale, de 11,30 *m* à 5,832 *m* et, en rabattement, (pl. VII) de 11,40 *m* à 5,834 *m*. La largeur des panneaux varie de 10,412 *m* à 5,00 *m*, et celle des faces de 31,704 *m* au niveau du deuxième étage à 10,00 *m* au-dessous du campanile.

La courbe extérieure est donnée par des changements d'inclinaison qui se produisent en général au droit des entretoises de deux en deux panneaux, sauf pour les panneaux 14, 15 et 18, qui ont chacun une inclinaison spéciale, et pour les quatre panneaux supérieurs, dont l'inclinaison est constante. Cette inclinaison varie de 82°,25',29" à 87°,12',31".

La planche XII, figure 5, donne la disposition de ces panneaux constitués, en outre des arbalétriers, par des entretoises et des croix de Saint-André. Les entretoises sont en caissons de 600 *mm* de hauteur et 520 *mm* de largeur, formés par quatre cornières d'angle de 80 × 80 × 10 et quatre faces de treillis en cornières de 45 × 45 × 5. Les croix de Saint-André ont la même largeur, mais une hauteur de 500 *mm* seulement; les cornières d'angle varient de 90 × 90 × 13 à 80 × 80 × 8; elles sont réunies par le même treillis de 45 × 45 × 5. Ces pièces s'assemblent sur des goussets découpés rivés sur les faces des arbalétriers.

Cette même planche donne également le raccordement des arbalétriers inférieurs avec les supérieurs. Le joint normal se fait à 4,97 *m* au-dessus de la face supérieure de la poutre du deuxième étage; au-dessous de ce plan la coupe et l'entretoise intérieure sont données figure 8. A 4,20 *m* au-dessus, se trouve un autre joint correspondant à la nouvelle section horizontale de 500 *mm*, donnée, ainsi que l'entretoise intérieure, par la figure 6. L'intervalle est formé par un tronc de pyramide de raccordement dont les faces extérieures sont dans le plan de celles des arbalétriers inférieurs, de manière que l'arête extérieure soit continue (voir pl. XIII *bis*, fig. 53 à 56).

La même planche (fig. 57 à 61) donne les arbalétriers intermédiaires *b* et *d* dans les panneaux 16 et 17, ainsi que le treillis qui les réunit (fig. 57) et le raccord de ces mêmes arbalétriers entre les panneaux 17 et 18. Leurs coupes respectives sont indiquées dans les figures 59 à 61. L'ensemble de ces panneaux 16 à 18 est représenté dans la planche XII *bis*, figures 16 à 24.

Les coupes des arbalétriers du panneau 12 au sommet sont données planche XIII *bis*, figures 20 à 26. Aux attaches des entretoises et des barres de treillis, sur la hauteur nécessaire à l'attache, le caisson des arbalétriers angulaires est complété et fermé sur ses quatre faces. De distance en distance, tous les 2,50 *m* environ, les arbalétriers sont entretoisés par des goussets d'angle s'opposant à la déformation des faces. Les joints sont distants de 5 à 7 mètres; ils sont soigneusement ajustés et recouverts de couvre-joints.

Au niveau de chaque entretoise, se trouve un entretoisement horizontal complet représenté dans les diagrammes de la planche VIII, figures 13, 14, 15, 18, 19, 20, 21, 22. Si les entretoisements n'étaient pas nécessaires dans les parties inférieures, il n'en est pas de même dans la partie supérieure : les faces sont plus larges et l'épaisseur des parois est beaucoup plus faible. Aussi était-il tout à fait indispensable de constituer un entretoisement complet maintenant tous les arbalétriers dans leur position relative.

Ces entretoisements laissent la place nécessaire au passage de la cabine de l'ascenseur vertical. Ils se composent tous d'une entretoise diagonale, A, à treillis de 1,00 *m* de hauteur et de plusieurs autres entretoises en caisson et également à treillis d'une hauteur de 300 *mm*. Ces poutres, du panneau 12 au panneau 16 (fig. 13, 14 et 15), portent les lettres B, C, D, E, F et réunissent deux à deux les arbalétriers intermédiaires symétriques, parallèlement aux diagonales : on constitue ainsi deux rectangles égaux perpendiculaires l'un à l'autre. Les faces supérieures de ces caissons sont réunies elles-mêmes par un grand treillis. A partir du panneau 17, jusqu'au panneau 27, les arbalétriers intermédiaires étant réunis en un seul, les deux rectangles se réduisent à un carré (fig. 18, 19, 20, 21). Enfin, jusqu'au panneau 29, le contreventement se réduit à l'entretoise diagonale.

Les contreventements précédemment décrits servent également à maintenir les poteaux-guides des ascenseurs et les escaliers de service conduisant du deuxième étage à la plate-forme supérieure, ainsi que l'indique la planche XII *bis* donnant tous les détails du contreventement situé entre les panneaux 17 et 18, figures 5 à 15.

A cet effet, la seconde diagonale d'entretoisement est formée par deux poutres, H et H', en forme de caisson en treillis de 600 × 600, interrompues au droit des poteaux-guides de l'ascenseur, pour ménager le passage de la cabine. La poutre H (pl. XII *bis*, fig. 7 et 8) a son extrémité maintenue à la poutre C' par deux poutres, K, formant contre-fiches, de manière à fixer rigidement le poteau-guide latéral B.

Le poteau-guide central A est un caisson de 0,80 *m* de hauteur (fig. 11 et 12), dont les membrures sont formées par une semelle de 0,60 *m*, réunie à 2 âmes de 0,25 *m* par deux cornières de 100. Les faces latérales sont en treillis double de cornières de 50×50×6. (Ce treillis est visible dans la figure 19 de la planche XXXII *ter*.)

Le poteau-guide latéral est également un caisson dont la hauteur est de 0,50 *m*, fig. 6 et 7. La semelle du côté des guides en fonte est pleine, celle du côté opposé est en treillis de fer plat de 60×8. La planche XII *bis* donne tous les détails relatifs aux poutres A, B et C (fig. 9, 10, 11, 14 et 15).

§ 7. — Plancher intermédiaire.

Par suite des conditions spéciales dans lesquelles on se trouvait, l'ascension de la deuxième plate-forme à la troisième ayant été divisée en deux courses égales avec transbordement, on a été conduit à établir à mi-hauteur de la partie supérieure de la Tour, un plancher intermédiaire, au niveau duquel se fait le changement de cabine et qui porte toute la machinerie de l'ascenseur Édoux (pl. XIX, fig. 14). Ce plancher sert aussi de palier à l'escalier tournant conduisant du deuxième étage au troisième. Cet escalier, placé au départ dans la moitié gauche de la Tour, est reporté pour la partie supérieure dans la moitié droite de manière à laisser libre la course des cabines.

Le plancher intermédiaire est établi à mi-hauteur du panneau 19 (pl. VIII, fig. 17); il se compose de quatre poutres, B, C, H, D de 2,30 *m* de hauteur (pl. XVI, fig 14 et 15), formant un carré qui relie les arbalétriers intermédiaires *bd*, et sur le milieu desquelles viennent s'assembler des contrefiches inclinées destinées à donner la rigidité nécessaire aux arbalétriers d'angle entre les panneaux 19 et 20. Ce niveau était en effet trop rapproché de celui du plancher intermédiaire pour que l'on pût effectuer un contreventement horizontal à cette hauteur.

Les poutres B, C, H (pl. XVI, fig. 15 et pl. XVII, fig. 45 à 61), qui supportent le réservoir de retour d'eau (volume 25 m^3), ainsi que les cylindres et les poteaux-guides, ont besoin d'une grande résistance. Elles ont une âme pleine formée par 3 tôles jointives assemblées au moyen de couvre-joints de 150×12 et armées par des cornières verticales de 70×70×7. Les cornières qui la réunissent aux semelles sont de 100×100×12 et les semelles elles-mêmes, au nombre de 2 ou 3, ont une section de 360×12. La poutre D, de même hauteur, ne porte que le poteau-guide latéral; aussi l'âme pleine est remplacée par un treillis (fig. 60 et 61) dont les barres, constituées par 2 cornières de 80×80×9 et 70×70×8 rivées entre elles, s'assemblent sur une âme de 450×9.

L'assemblage des poutres B, C, H avec les arbalétriers s'opère au moyen de goussets coudés rivés sur la branche intérieure du simple T que forme la section des arbalétriers *bd* (pl. XVII, fig. 45 et 48); celui de la poutre D s'opère d'une manière analogue; il est dessiné fig. 60.

Les poutres B et H portent en leur milieu (pl. XVI, fig. 14) une poutre A de même hauteur. Sur ce cadre puissant et fortement contreventé s'assemblent toutes les poutres secondaires destinées à porter les cylindres de l'ascenseur, les escaliers tournants et le plancher proprement dit.

Les contrefiches inclinées remplaçant le contreventement sont formées les unes par un caisson en cornières de 0,45 *m* de hauteur et 0,368 *m* de largeur (pl. XVII, fig. 49, 53, 55), les autres par une poutre en treillis de 0,45 *m* de hauteur (fig. 58 et 59). Elles s'attachent directement aux arbalétriers et aux poutres principales par des goussets, sauf sous le réservoir où la poutre principale H porte une forte console, sur laquelle s'assemble la contrefiche correspondante (fig. 52 et 57).

Les poutres E de 1,20 *m* de hauteur (pl. XVI, fig. 14-15 et pl. XVII, fig. 46-47), destinées à supporter les cylindres de l'ascenseur, sont à âme pleine et s'assemblent sur les poutres C et A à 330 *mm* de leur semelle inférieure. Les cylindres s'y reposent par l'intermédiaire de trois poutres perpendiculaires aux premières; deux de celles-ci, espacées de 748 *mm* d'axe en axe, sont représentées en coupe, fig. 47, la troisième est placée près du poteau-guide central à 992 *mm* de celui-ci, fig. 14.

La poutre F (pl. XVI, fig. 14 et 15 et pl. XVII, fig. 46 et 51), qui supporte le noyau de l'escalier, est en forme de caisson de 700 *mm* de hauteur et s'assemble à mi-hauteur sur les poutres C et A. Les 2 âmes verticales, espacées de 400 *mm*, sont pleines; elles portent en haut et en bas des cornières de 80×80×8 sur lesquelles s'assemblent les treillis doubles formant les parois horizontales.

Toutes les autres poutres, K, N, O, P, R, S, T, U, X, Y, Z, de 180 *mm* de hauteur portent le plancher proprement dit et sont assemblées sur les semelles supérieures des poutres A, B, C, D, H, précédemment décrites. Certaines parties de ce plancher, destinées à encadrer exactement la cabine, sont supportées par des consoles, α, β (pl. XVII, fig. 50), portant à leur extrémité des poutres de rive, LM (pl. XVI, fig. 14 et 15), de 180 *mm* de hauteur. Le tout est recouvert par une tôle striée portée par des solives en fer.

La salle des machinistes de l'ascenseur Édoux est placée en contre-bas de cette plate-forme; son plancher (pl. XVI, fig. 16 et 17) est formé de fers à T de 175×80×7 reposant sur les semelles inférieures des poutres A et C. Le sol du plancher est formé par des madriers non jointifs sur lesquels s'applique un parquet en bois.

§ 8. — Panneau 29.

A partir du panneau 29, qui se termine par le plancher du troisième étage, les arbalétriers deviennent verticaux et présentent un mode de liaison spécial que l'on s'est attaché à rendre particulièrement robuste, de façon à obtenir à ce niveau supérieur une solidarité complète de tous les arbalétriers en même temps qu'à répondre à des nécessités architecturales. L'ensemble en est donné par les planches VIII, fig. 23 et 24, et VII, fig. 4, les détails par la planche XIV.

Pour obtenir le résultat désiré, on a réduit de moitié la largeur des panneaux par l'adjonction de faux arbalétriers intermédiaires (pl. XIV, fig. 11). Ces pièces comprennent une semelle de 500×6 raidie sur les bords par des cornières de 60×60×6 et en son milieu par une poutre en treillis de 0,500 *m* de hauteur formée par 4 cornières de 60×60×6 et un treillis en fer plat de 50×6. A leur rencontre avec les ceintures inférieures, l'âme est pleine et des semelles sont ajoutées de manière à obtenir la section double T (pl. XIV, fig. 12).

Ce panneau 29 comprend:

A la base, une ceinture de 3,500 *m* de hauteur formée par deux poutres en caisson reliées par un treillis quadruple.

Au-dessus, douze petits panneaux reliés par des croix de Saint-André et enfin des consoles de 7,207 *m* de hauteur fixées sur les faces extérieures des arbalétriers d'angle et destinées à supporter la galerie du troisième étage.

Les deux poutres formant la ceinture inférieure sont espacées de 2,000 *m* d'axe en axe (pl. XIV, fig. 2, 6, 12), elles sont formées par des caissons réunissant les arbalétriers, et sur lesquels viennent s'assembler les faux arbalétriers intermédiaires. Les faces verticales de chacun de ces caissons sont pleines et comportent

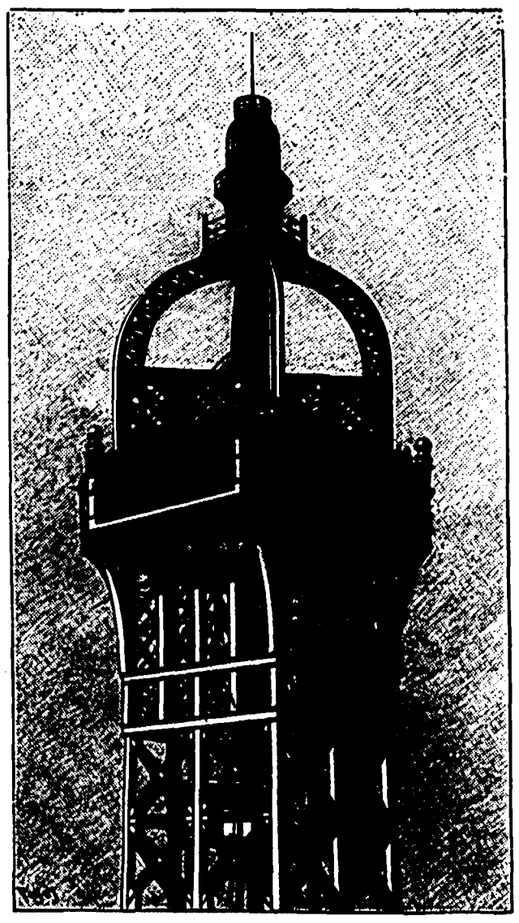


Fig. 108. — Vue de la partie supérieure.

deux âmes de 600×6 raidies sur les bords par des cornières de 80×80×8; les faces horizontales sont en treillis simple composé de plats de 60×7. Le treillis quadruple reliant les deux caissons est composé de barres comprenant chacune 2 cornières de 60×60×6 rivées entre elles.

Le treillis des douze petits panneaux supérieurs est formé par des entretoises horizontales et des croix de Saint-André. Chaque élément comprend deux cornières de 70×70×8 rivées entre elles.

L'entretoise horizontale supérieure est constituée par 2 âmes verticales de 600×7, armées de cornières horizontales de 60×60×7 (fig. 2 et 6). Elle se prolonge sur chaque face sur 3,00 *m* de longueur et vient soutenir la galerie entourant la troisième plate-forme; son âme est alors en treillis double de cornières de 40×40×5, sauf aux extrémités, où se font les attaches avec les consoles de support et les poutres de rive. Ces dernières, de 850 *mm* de hauteur, à âme pleine armée par des cornières de 80×80×8, supportent au-dessus d'elles une seconde poutre à âme pleine de 3 *mm* et de 1,200 *m* de hauteur formant garde-corps. La main courante en bois est fixée sur des cornières de 40×40×5 rivées au haut de cette âme (fig. 2 et 7).

Les consoles supportant la galerie ont une hauteur de 7,207 *m*. Elles comprennent chacune deux âmes évidées de 6 *mm* d'épaisseur découpées suivant un arc de cercle de 9,280 *m* de rayon et assemblées sur des arbalétriers par des cornières de 100×100×10. Ces deux âmes sont réunies sur leur bord libre par des cornières de 60×60×7 à une semelle cintrée de 500×6 (fig. 13). Des croisillons et des entretoises horizontales les réunissent à différents niveaux; le détail de celles-ci est indiqué fig. 2, 13 et 14.

§ 9. — Plancher du troisième étage.

Ce plancher, à la cote de + 309,63 et à 273,63 *m* au-dessus des appuis, comporte, en outre de la galerie promenade de 3,00 *m* de largeur libre située sur tout son pourtour au-dessus des consoles (pl. XIX, fig. 3), une partie centrale dans laquelle passent les arbalétriers d'angle et les quatre arbalétriers intermédiaires; entre les pieds de ces arbalétriers, auxquels se rattachent de grandes consoles supportant les poutres diagonales supérieures, sont logés la cage de la cabine Édoux avec ses guides, les accès à l'escalier inférieur et à l'escalier en hélice montant à la plate-forme supérieure dont je m'étais réservé la jouissance, enfin un certain nombre de boutiques de vente pour menus objets.

Le forme est celle d'un carré de 16,56 *m* de côté à angles abattus, la longueur du grand côté est de 10,90 *m* et celle du petit 3,15 *m*.

La disposition générale des fers est donnée par les figures 18 et 19 de la planche XVI et les détails, coupes et attaches par les figures 62 à 84 de la planche XVII. Le diagramme est représenté aux figures 23 et 24 de la planche VIII.

Il comprend : 1° un cadre formé comme précédemment par la liaison des arbalétriers intermédiaires, interrompu sur un côté pour le passage de la cabine; les trois poutres qui le constituent, B, C, B', sont des poutres pleines, de 2,00 *m* de hauteur; 2° une poutre transversale, A, réunissant les poutres B et B', composée de même et portant le guide central de l'ascenseur et les cornières de suspension du réservoir de 3,00 *m* de diamètre situé au-dessous du plancher; 3° une poutre D portant le second guide de l'ascenseur, qui a seulement 1,50 *m* de hauteur; 4° deux poutres, F, complétant le passage de la cage et n'ayant à porter que le plancher, leur hauteur est de 0,40 *m*; 5° trois poutres, E, supportant le plancher et consolidant les angles restés libres formés par les entretoises des arbalétriers. Ces poutres ont également 0,40 *m* de hauteur.

Les poutres B, B' et C (pl. XVII, fig. 62, 63, 64, 65 et 69) sont attachées sur les arbalétriers par des goussets coudés. Ce sont des poutres à âme pleine de 2,00 *m* de hauteur et 9 *mm* d'épaisseur avec deux joints longitudinaux, armées par des cornières de 90×90×11 et une semelle de 200×10.

La poutre A (même planche, fig. 69 *bis*, 70, 71, 75) est une poutre semblable aux précédentes, sauf qu'elle porte deux semelles; elle reçoit le poteau-guide central.

Les poutres A et C servent aussi de support à un réservoir en tôle de 3,00 *m* de diamètre et 3,80 *m* de hauteur (pl. XXIII[1], fig. 17) servant à la distribution de l'eau de l'ascenseur Edoux et dont le cube est de 25 m^3. Elles portent les attaches de quatre tirants de suspension formés chacun par quatre cornières de 60×60×7. Ces tirants s'assemblent sur deux poutres transversales (fig. 1 et 2) passant sous une couronne en tôle de 0,45 *m* de hauteur sur laquelle est rivé le réservoir. Pour éviter tout balancement de celui-ci, les poutres sont reliées par des contre-fiches horizontales aux arbalétriers intermédiaires et au guide central. Une passerelle permet d'accéder au robinet d'arrêt placé au-dessous du réservoir.

La poutre D (pl. XVII, fig. 72 et 73) a une âme pleine de 1,50 *m* de hauteur sur 8 *mm* d'épaisseur, armée par des cornières de 70×70×9.

Les poutres E et F (fig. 76, 77, 78 et 80) sont des poutres pleines dont l'âme a 400×8 et les cornières 70×70×8.

Quant aux solives du plancher, elles sont formées par des fers double T de 0,14 *m*. de hauteur, espacés de 0,73 *m*. environ.

Un contreventement en cornières de 60×60×7 réunit les angles du carré dans lequel est inscrit le réservoir suspendu aux poutres A et C.

Le sol est formé par des madriers jointifs de 0,08 *m* placés sur les solives et recevant l'asphalte. La galerie-promenade a été surélevée de 0,18 *m* au moyen de lambourdes et d'un parquet de 25 *mm* recouvert de linoléum.

§ 10. — Quatrième plate-forme et étage réservé.

Cette plate-forme, située à la cote + 312,21 (pl. XIX, fig. 3 et 6), comporte une terrasse de 2,77 *m* de largeur avec garde-corps et un bâtiment central carré de 10,50 *m* de côté renfermant, outre la cage de l'ascenseur, un certain nombre de pièces affectées soit à des laboratoires, soit à un salon de réception.

Sa forme est semblable à celle de la troisième plate-forme, c'est-à-dire qu'elle est celle d'un carré de 16,60 *m* de côté à angles abattus; les grands côtés ont 10,00 *m* de longueur et les petits côtés 2,30 *m*.

La sablière de pourtour (pl. XIV, fig. 7 à 10) est un fer à U composé ayant une âme de 200×4 et des cornières de 40×40×5. Elle est supportée par des montants formés par une double cornière de 50×50×6 rivée sur la paroi pleine du garde-corps de la troisième plate-forme. L'une de ces cornières prolongée réunit trois fers ronds formant les lisses du garde-corps de la terrasse.

Sur cette sablière s'assemblent des fers à plancher de 120×5×48 espacés en général de 1,10 *m*, avec une certaine pente pour l'écoulement des eaux de la terrasse. Ils s'assemblent par leur autre extrémité (pl. XIV, fig. 2) sur la membrure inférieure d'une poutre double à treillis formant une solide entretoise des arbalétriers. Cette poutre, logée dans l'intérieur des parois en bois limitant la partie centrale, a une hauteur de 2,50 *m*; ses membrures, formées par une âme de 250×7 et deux cornières de 80×80×9, sont reliées par un treillis à croix de Saint-André en cornières de 60×60×7 avec des montants intermédiaires recevant les attaches des solives. C'est à la partie supérieure de ces poutres que s'arrêtent tous les arbalétriers auxquels elles servent d'entretoises.

La partie centrale (pl. XVI, fig. 20), ménage le vide de l'ascenseur et reçoit un certain nombre de poutrelles d'une hauteur uniforme de 0,25 *m*, sur lesquelles s'attachent les solives du plancher, de 0,12 *m* de hauteur (pl. XVII, fig. 85 à 87).

Le plancher supérieur est composé d'une manière analogue (pl. XIX, fig. 8); il est formé par des fers de 100 *mm* qui s'attachent sur la membrure inférieure des grandes poutres diagonales (pl. XIV, fig. 4) et reçoivent un lambrissage recouvert de plomb.

§ 11. — Grandes poutres diagonales et cintres du campanile.

A partir du niveau supérieur des poutres-entretoises des faces dont nous avons parlé plus haut, les arbalétriers intermédiaires sont interrompus, les arbalétriers d'angle sont prolongés sur une hauteur de 4,50 *m* et reçoivent les attaches de deux grandes poutres diagonales de même hauteur, dont l'une est destinée à recevoir les poulies supérieures de l'ascenseur Edoux (pl. XIX, fig. 3, 4, 5 et 8). Cette attache se fait sur la partie pleine des abouts des poutres, en pliant à 135° les cornières de bordure de l'arbalétrier (pl. XIV, fig. 2). Cette même planche, figures 1, 2, 3, 4 et 5, donne tous les détails des poutres diagonales dont l'ensemble est représenté par la figure 4 de la planche VII.

Ces poutres, d'une longueur de 14,87 *m* et de 4,50 *m* de hauteur, sont doubles et espacées de 0,77 *m* d'axe en axe. Leurs membrures, formées par une âme de 400×10, des cornières de 90×90×10 et une semelle de 360×10, sont réunies par un treillis sextuple en doubles cornières de 60×60×7. Les barres comprimées sont unies de l'une à l'autre poutre par un treillis; de même à la partie supérieure comprimée sous la charge, les deux semelles de 360 sont réunies par une tôle de 540×4.

De ces deux poutres, qui se croisent à angle droit dans la partie centrale (fig. 5), l'une est continue et reçoit les poulies de transmission de l'ascenseur Edoux, dont la réaction très considérable est portée par trois panneaux pleins de 1,25 *m* de largeur interrompant le treillis (fig. 4). Les panneaux extrêmes sont en outre soutenus par des contrefiches inclinées venant prendre un nouvel appui sur l'arbalétrier d'angle au niveau de la galerie du troisième étage. Ces contrefiches sont formées par un caisson, dont les parois verticales sont constituées par une âme de 600×8 raidie, haut et bas, par des cornières de 70×70×8.

Dans le plan de ces poutres sont disposés deux arcs demi-circulaires, reliant leurs extrémités et venant supporter à leur sommet le plancher du phare à la cote (326, 715) (pl. XV, fig. 2).

Ces arcs, perpendiculaires l'un à l'autre, ont une largeur de 1,300 *m*; le rayon de leur extrados est de 7,435 *m*. Leur section suivant un plan diamétral est un caisson de 1,300 *m* sur 0,77 *m*. Les deux poutres qui les composent sont formées chacune par quatre cornières de 50×50×6 reliées par des montants et un treillis en cornières de même dimension (fig. 40). Ces poutres elles-mêmes sont réunies l'une à l'autre par quatre cadres à croisillons et par un contreventement en fers plats de 50×8. A leur sommet ces arcs forment un carré, à l'intérieur duquel est fixé, au moyen de collerettes, le cylindre en tôle de 690 *mm* de diamètre intérieur servant de noyau à l'escalier tournant du phare (fig. 36 à 39). Dans l'intérieur de ce cylindre on a fixé une échelle verticale en fer permettant d'accéder au phare, même pendant les plus grands vents.

§ 12. — Phare.

Le plancher du phare (pl. XVI, fig. 22) présente en plan la forme d'un carré à angles abattus. Les grands côtés ont 3,40 *m* de longueur et les petits côtés 0,70 *m*.

Il est formé par quatre poutres doubles de 250 *mm* de hauteur (pl. XV, fig. 1,

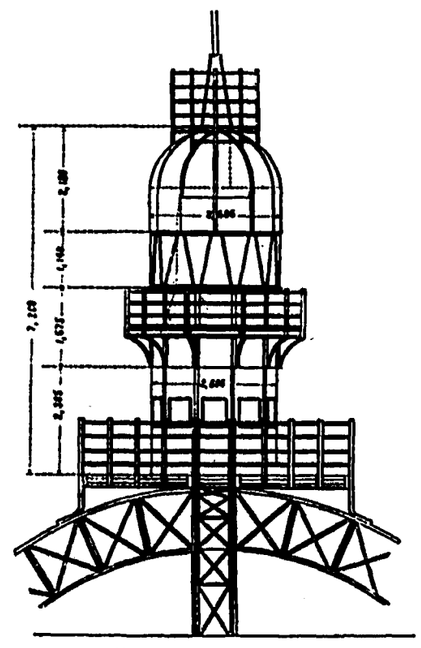


Fig. 109. — Phare.

30 et 37) situées dans le plan diagonal des arcs. Elles sont constituées chacune par deux poutrelles, dont l'âme de 250×7 est armée de quatre cornières de 70×70×7. Ces poutres s'assemblent près du noyau de l'escalier sur des goussets rivés aux cornières des arcs diagonaux et leurs extrémités réunies par une poutre de rive en U de même hauteur sont supportées par des cornières verticales fixées sur les arcs au moyen de goussets (détail M, fig. 40 et 41). Ces dernières cornières, rivées sur l'âme des poutres, se prolongent verticalement de 1,090 *m* au-dessus du plancher et constituent les montants du garde-corps.

Les quatre poutres principales et les poutres de rive supportent des fers double T de 140×47×6 espacés de 600 *mm*, recouverts par des madriers jointifs sur lesquels est étendu l'asphalte.

La lanterne du phare (pl. XVI, fig. 24 et pl. XV, fig. 1) est un prisme décagonal de 3,980 *m* de hauteur, dont le côté a 0,80 *m* et qui est surmonté d'une coupole de 2,180 *m* de hauteur. C'est cette dernière qui porte la plate-forme supérieure de la Tour à la cote 334,015 et à 300 *m* au-dessus du sol du Champ-de-Mars.

La partie inférieure, formant *chambre de service*, est en tôle pleine percée seulement d'une porte donnant accès au balcon de pourtour, et d'étroites fenêtres. La paroi en tôle, de 3 *mm* d'épaisseur, s'assemble sur des montants formés par deux cornières de 30×30×4 pinçant une âme de 50×4. Cette chambre de service, de 2,342 *m* de hauteur, est limitée à sa partie supérieure par le plancher de la

lanterne, porté en son milieu par le cylindre en tôle formant le noyau de l'escalier.

Le phare proprement dit est placé sur ce dernier plancher et les parois en tôle sont disposées de manière à dégager complètement l'horizon en regard de l'appareil optique, sur une hauteur de 1,14 *m*. A cet effet, la coupole sphérique, de 2,686 *m* de diamètre, est supportée par des barreaux inclinés en fer rectangulaire de 20×30, sur lesquels s'assemblent les cornières cintrées de 60×60×6 formant l'ossature de la coupole. La hauteur de cette lanterne jusqu'au niveau du plancher de la coupole est de 3,36 *m* (pl. XV, fig. 1 et 2); un balcon de service pour le nettoyage des verres, auquel on accède par une petite porte spéciale, règne autour de cette lanterne; il est supporté par des consoles représentées figures 33, 34 et 35.

Une échelle en fer inclinée conduit à un plancher rectangulaire de 0,792×2,44 *m*, situé à la base de la coupole (fig. 26, pl. XVI). A partir de celui-ci, une échelle verticale conduit au plancher circulaire en tôle striée, de 1,70 *m* de diamètre, qui constitue la plate-forme de 300 mètres. Au-dessus, se trouve fixé, sur un trépied, le paratonnerre, dont la longueur totale est de 10,790 *m*. C'est un fer rond de 60 *mm* à la base, terminé par trois pointes inclinées de 1,50 *m* et qui porte le pavillon national (pl. XIX, fig. 4).

Le garde-corps de cette plate-forme, qui a 1,20 *m* de hauteur, est formé par des cornières de 60×60×8. Cinq de celles-ci sont cintrées de manière à venir s'assembler sur une douille pentagonale qui maintient le paratonnerre à 2,05 *m* au-dessus de sa base.

Tous les détails d'assemblage de cette partie supérieure de la Tour sont dessinés à grande échelle dans la planche XV.

§ 13. — Poutres de l'arc et arcs décoratifs.

Nous avons vu, lors du calcul des ceintures, que les poutres du premier étage avaient des dimensions suffisantes pour résister aux poussées dues à l'inclinaison des montants. Les poutres placées au-dessous, nommées « poutres de l'arc » (pl. VII, fig. 1 et pl. XI, fig. 19 et 20), servent à supporter les arcs décoratifs, et leur hauteur a été déterminée uniquement par des considérations d'aspect. Leurs membrures inférieures sont à une hauteur telle que les arcs décoratifs s'inscrivent dans le trapèze formé par ces poutres et les deux montants. Ces arcs décoratifs, considérés dans le plan des montants, sont des cercles.

Les poutres de l'arc sont semblables, comme dispositions, aux poutres du premier étage précédemment décrites, elles ont la même inclinaison que celles-ci et présentent le même mode de construction. Ce sont des poutres doubles placées dans les plans des faces intérieures et extérieures des montants de la Tour, réunies l'une à l'autre par des entretoisements verticaux et des contreventements horizontaux supérieurs et inférieurs. Leur longueur est de 45,287 *m* à la base et de 38,250 *m* au sommet; leur hauteur est de 7,00 *m* en projection verticale et de 7,834 *m* suivant leur plan.

Leurs membrures comportent une semelle de 610×8 assemblée par des cornières spéciales de 100×100×12 à angle aigu ou obtus, avec des âmes de 330×6 placées dans les plans des faces intérieures et extérieures des arbalétriers. Ces âmes sont reliées par un treillis quadruple et de distance en distance par des montants verticaux formant des panneaux de 3,8825 *m* de largeur (pl. XI, fig. 19 et 20). La section des barres de treillis en caisson est dessinée figures 36 et 37, celle des montants des faces extérieures est aussi dessinée figure 38, leur largeur est de 500 *mm*. Les montants des faces intérieures sont beaucoup plus grêles; ils sont formés par une double cornière de 70×70×7 (fig. 33 et 35). Le diagramme de ces poutres et toutes les coupes et détails d'assemblages étant dessinés dans la planche XI, nous limiterons ici leur description.

Les arcs décoratifs (pl. VII, fig. 1, et pl. XI, fig. 1, 2, 14, 15 et 18), au nombre de deux sur chaque face, sont constitués par deux membrures cintrées en caisson de 600 *mm* de hauteur, dont l'écartement intérieur est de 2,72 *m*. L'intervalle entre ces deux membrures est divisé en panneaux par des montants de 400 *mm* de largeur, dirigés suivant des rayons, lesquels se prolongent à travers les tympans jusqu'aux arbalétriers et aux poutres de l'arc.

Sur les faces intérieures et extérieures, ces tympans sont décorés entre les montants par des tôles de 3 *mm* découpées en arc de cercle. De même chacun des panneaux des arcs est orné sur ces mêmes faces par un motif formé de cornières et de volutes avec macarons en fonte (pl. XI). Les panneaux restent sans aucune décoration sur les autres faces (fig. 18).

Les deux arcs placés sur une même face de la Tour sont entretoisés dans le sens vertical sur trois points : à leur sommet et suivant les bissectrices des tympans (pl. VIII, fig. 8 et pl. XI, fig. 22 à 25).

La membrure d'extrados de l'arc décoratif, tangente au sommet à la membrure inférieure de la poutre de l'arc, vient s'amortir contre les arbalétriers un peu au-dessous de l'entretoise horizontale du panneau 3. Son attache est représentée (pl. XI, fig. 13).

La membrure d'intrados, tangente à l'arbalétrier à la base du panneau 2 (fig. 3 à 12), se détache de celui-ci et vient se terminer sur une retombée factice reliée au soubassement général de la pile (pl. VII, fig. 1 et pl. V, fig. 12, 15 et 16). Dans la moitié inférieure du panneau 1, elle est reliée à l'arbalétrier par un léger treillis représenté figures 1, 2 et 7, planche XI.

Pour éviter le mauvais effet dû au contraste des panneaux 4, largement évidés par rapport aux poutres de l'arc dont le treillis est quadruple, on a été conduit à placer sur ces panneaux des masques reproduisant les treillis des poutres (pl. VII, fig. 6 et pl. X, fig. 11).

Ces masques, qui existent sur toutes les faces extérieures, sont formés par une poutre horizontale en treillis serré placée au niveau de l'entretoise de séparation des panneaux 3 et 4 et rachetant la différence de hauteur qui existe entre celle-ci et la membrure inférieure de la poutre de l'arc : soit 2,75 *m* entre les membrures. Celles-ci sont en tôle de 4 *mm* d'épaisseur, ayant comme hauteur 630 *mm* pour celle du bas et 750 pour celle du haut. Les deux parois de cette poutre, distantes de 1,12 *m*, de manière à ménager l'espace nécessaire pour le passage des croix de Saint-André, sont attachées sur les arbalétriers par des cornières spéciales représentées planche X, figure 11.

Ces poutres sont surmontées d'une seconde de 7,83 *m* de hauteur ayant le même aspect que la poutre de l'arc dont elle figure le prolongement. Les fers qui la composent, n'entrant pas dans la résistance de l'ossature, ont une très faible épaisseur, soit 4 *mm*.

§ 14. — Poutres d'ascenseurs.

La voie des ascenseurs inclinés est fixée sur deux poutres parallèles aux arbalétriers, allant des fondations jusqu'au-dessus du deuxième étage, et nommées pour cette raison « poutres d'ascenseurs » (pl. XX, fig. 3 et 4 et pl. XXI).

Ces deux poutres en treillis, de 1,30 *m* de hauteur, sont espacées de 3,80 *m* d'axe en axe (pl. XXII$_3$, fig. 24, 25 et 26). Leurs membrures, constituées par deux cornières de 80×80×8 pinçant une âme de 280×7, sont réunies par des montants verticaux de 60×60×7 et des croix de Saint-André en cornières de 70×70×8. La membrure supérieure est renforcée par une semelle de 285×8, raidie sur le bord intérieur par une cornière de 70×70×8 placée au-dessous.

Les deux poutres sont réunies à la partie inférieure par des barres transversales formées d'une cornière de 60×60×7 rivée sur un fer plat de 150×8, et par des croix de Saint-André en cornières de 60×60×7. Les angles sont consolidés par des goussets triangulaires de 8 *mm* d'épaisseur.

Ces poutres reposent à la partie inférieure (pl. IV, fig. 23 et pl. XX, fig. 4) sur la face inclinée du massif des fondations le plus rapproché du centre de la Tour; leur extrémité vient buter contre un redan de maçonnerie, perpendiculaire à leur inclinaison. Elles sont fixées à l'ossature de la Tour (pl. IX, fig. 30), à la hauteur des entretoises des montants, par des goussets coudés s'attachant d'une part sur la face supérieure de l'entretoise, et de l'autre sur les membrures inférieures des poutres. Au droit de ces attaches, le contreventement inférieur forme des panneaux plus étroits et le treillis des faces porte des montants horizontaux en double cornière de 60×60×7 (pl. XXII^2, fig. 24, 25, 26).

Dans les piliers 1 (Nord) et 3 (Sud), on a installé des ascenseurs Otis, et les poutres de l'ascenseur sont utilisées sur toute leur hauteur. Dans les autres piliers, contenant les ascenseurs Roux, Combaluzier et Lepape, la partie de ces poutres comprise entre le premier et le deuxième étage, est restée libre et n'a été utilisée que lors du montage.

Pour les ascenseurs Otis, les rails Vignole de 130 *mm* de hauteur (fig. 21, 22 et 23) sur lesquels roulent les cabines, reposent sur ces poutres par l'intermédiaire de coussinets. Des boulons prenant appui sur la semelle supérieure des poutres, viennent se serrer sur des pièces de calage épousant la forme du patin du rail. Ces dernières sont elles-mêmes maintenues dans les coussinets, par des clavettes en fer. Les champignons de deux rails consécutifs sont maintenus exactement en regard l'un de l'autre par un goujon de 16 *mm* noyé dans leur épaisseur (fig. 19 et 20). De distance en distance, le rail est rivé sur une pièce qui bute contre des taquets fixés sur les poutres et qui s'opposent à tout glissement de la voie sur celles-ci (fig. 21, 22 et 23).

Les poulies de guidage des câbles, disposées de part et d'autre de la voie, sont fixées sur des supports d'attache portés par une poutre de 300 *mm* de hauteur, rivée sur la membrure inférieure des poutres de l'ascenseur. Les poulies de renvoi des câbles au-dessus du deuxième étage, reposent sur des poutres de 622,5 *mm* (pl. XXII *bis*, fig. 57 et 58), fixées elles-mêmes sur un cadre puissant formé par des poutres horizontales de 700 *mm* de hauteur, reposant d'une part sur les poutres de l'ascenseur et de l'autre sur des poteaux de 8,209 *m* de hauteur et de 400 *mm* de largeur. Cette charpente est contreventée dans le plan horizontal supérieur, et les angles sont renforcés par des contrefiches inclinées.

Pour les ascenseurs Roux, Combaluzier et Lepape, la voie est établie différemment. Le rail, de 70 *mm* de hauteur, est fixé sur des longrines par des tirefonds (pl. XXIII, fig. 14). Les longrines sont fixées par des boulons à crochet sur l'aile intérieure de la semelle des poutres; l'autre aile porte les attaches des supports des gaines. Ceux-ci, espacés de 2,30 *m*, sont formés par des cornières de 55×55×8, coudées à angle droit et pinçant une âme de 150×7. Ils s'assemblent sur une tôle verticale de 10 *mm* d'épaisseur, placée dans le prolongement de l'âme de la poutre et fixée par une cornière sur la membrure supérieure de celle-ci. Le coude est soutenu par une contrefiche inclinée en double cornière de 55×55×8, qui s'attache par un gousset sur la membrure inférieure de la poutre de l'ascenseur.

A 11,25 *m* au-dessus du premier étage (pl. XXIII *bis*, fig. 1 et 2), les poutres de l'ascenseur servent de support à deux traverses horizontales sur lesquelles reposent les paliers de la poulie de renvoi de l'ascenseur Combaluzier. Des poteaux en tôle et cornières de 500 *mm* de largeur, les supportent dans leur milieu et des contrefiches en cornières soutiennent leurs extrémités.

Dans les montants 1 et 3, on a disposé, au-dessous des poutres de l'ascenseur et parallèlement à celles-ci, des poutres de 45 mètres de longueur destinées à servir de chemin de roulement au contrepoids (pl. XX, fig. 4 et pl. XXII^4, fig. 3). Elles sont formées chacune de deux poutres pleines de 300 *mm* de hauteur, écartées de 1,00 *m* d'axe en axe (fig. 57 et 58) et constituées par une âme de 300×9 et quatre cornières de 90×90×12. Ces poutres sont réunies de distance en distance par des entretoises de 270 *mm* de hauteur formées par une âme de 270×6 et quatre cornières de 60×60×6; un contreventement en plats de 60×8 réunit leurs membrures inférieures.

Ces poutres reposent à la base sur les pierres de Château-Landon servant de

support à l'arbalétrier intérieur (fig. 53). Elles sont supportées par l'ossature de la Tour au niveau des entretoises horizontales, au moyen de goussets coudés. Les rails de 130 *mm* de hauteur (fig. 4 et 5), sont fixés sur les poutres par l'intermédiaire de coussinets, et des butées s'opposent à leur glissement sur celles-ci (fig. 6 à 20).

§ 15. — Escaliers.

a) *Escaliers du rez-de-chaussée au premier étage.* — Dans les piles 3 et 4 (Est et Ouest) sont disposés des escaliers droits de 1,20 *m* entre garde-corps. Ces escaliers ont des marches de 0,25 *m* de largeur et de 0,16 *m* de hauteur, ils sont suspendus aux points solides de la construction (pl. XXVIII, fig. 1) qui se trouvent à la rencontre des barres de treillis et des arbalétriers. De nombreux paliers rendent la montée très facile. L'escalier de la pile 2 sert à la montée, l'autre à la descente.

La hauteur totale de l'escalier (56,05 *m*) est divisée en trois parties : 1° le départ du rez-de-chaussée compris entre le rez-de-chaussée et l'entretoise inférieure du montant, soit 4,82 *m* de hauteur ; 2° la partie courante, comprise entre l'entretoise inférieure du montant et le bas du panneau 5, soit 44,00 *m* ; 3° l'arrivée au premier étage comprise dans la hauteur du panneau 5, soit 7,23 *m*.

Nous allons décrire la partie courante, les deux autres parties de construction analogue (pl. XXVIII, fig. 2 à 4 *bis*, 28 à 29 *ter*, 30 à 33 et 37 à 44) n'en différant que par le nombre des marches et les dimensions des paliers.

La hauteur totale de 44,00 *m* de la partie courante (pilier 2) a été subdivisée en quatre éléments identiques de 11,00 m. de hauteur correspondant aux panneaux de la Tour. Chacun de ces éléments a été subdivisé lui-même en trois parties : deux ayant chacune 3,8366 *m* de hauteur et une de 3,3268 *m* (fig. 5).

Ces parties sont séparées l'une de l'autre par un palier, de sorte que, outre les deux paliers établis au niveau des entretoises des panneaux, il y a encore deux paliers intermédiaires P_m et P_a (fig. 1). Les deux premières montées vont de gauche à droite tandis que la suivante revient de droite à gauche de manière à ménager le passage de la cabine.

Un élément de 11,00 *m* de hauteur est assemblé à l'ossature de la Tour au niveau des entretoises horizontales du panneau dans lequel il se développe (fig. 1). A cet effet, dans l'angle formé par ces entretoises, au sommet duquel se trouve l'arbalétrier intérieur, est établie une poutre P_t assemblée auxdites entretoises (fig. 10 à 17). Elle se compose d'une âme de 720 × 9, coudée à ses extrémités, et de quatre cornières de 80 × 80 × 9. Son attache sur les entretoises s'opère au moyen de goussets coudés de 430 × 8.

Trois barres de suspension B_a (fig. 1 et 19) assemblées sur la poutre P_t descendent verticalement jusqu'au double palier P_a de la partie courante inférieure. Les paliers se projettent horizontalement comme l'indique la figure 6 ; deux barres s'assemblent aux poutrelles du palier P_m (fig. 22, 23, 24), les trois barres viennent s'assembler au double palier P_a. Elles sont en outre fixées à l'entretoise diagonale du montant ; cette liaison a pour but d'empêcher un balancement des escaliers (fig. 20 et 21) et c'est la position de cette cornière qui a déterminé celle de la poutre P_t qui sert de support principal. Chacune des barres de suspension est formée de deux cornières disposées en croix ; pour la barre du milieu, ces cornières ont 80 × 80 × 9, pour les autres, 70 × 70 × 8.

Les paliers P_a situés aux changements de direction (fig. 5 et 6) ont 1,30 *m* sur 2,216 *m*, le platelage en bois a 0,08 *m* d'épaisseur et repose sur quatre poutrelles de 415 *mm* de hauteur composées d'une âme de 8 *mm* et de deux cornières de 70 × 70 × 8. Elles sont assemblées à la poutre P_t (pour le palier établi dans l'angle des entretoises) et elles sont suspendues par les barres B_a (pour le palier intermédiaire). Le palier P_m (fig. 22, 23, 24) qui sépare les deux tronçons d'escalier de 3,8366 *m* de hauteur n'a que 1,00 *m* sur 1,008 *m*. Le platelage de 8 *cm* repose sur deux cornières de 70 × 70 × 8 fixées sur les faces intérieures des poutrelles de 415 *mm* de hauteur, composées d'une âme de 8 *mm* et de deux cornières de 70 × 70 × 8.

Les tronçons d'escalier T_2 (fig. 5 et 6) ont chacun une longueur horizontale de 5,75 *m*, le tronçon T_1 n'a que 5,20 *m* de longueur. Ils sont composés de deux limons formés par une poutre en U de 350 *mm* de hauteur composée d'une âme de 350 × 8, raidie sur les bords par des cornières de 70 × 70 × 8 (fig. 7, 8, 9 et 9 *bis*). La marche est formée par une planche de chêne de 4 *cm* d'épaisseur reposant par ses extrémités sur deux cornières de 40 × 40 × 5 assemblées aux limons, et suivant sa longueur sur une cornière de 40 × 40 × 5 assemblée sur la contre-marche. Cette dernière est en tôle de 3,5 *mm* et se fixe au limon par des cornières de 40 × 40 × 5. Chaque tronçon T_2 comprend vingt-trois marches et le tronçon T_1, dix-neuf.

Les garde-corps de 1,00 *m* de hauteur (fig. 9 *bis*) sont formés par des cornières verticales de 60 × 60 × 7 et quatre lisses en fer rond de 20 *mm*.

b) *Escaliers du premier au deuxième étage.* — Au delà du premier étage jusqu'au deuxième, on a disposé dans chacun des quatre montants des escaliers héliçoïdaux de 0,60 *m* de largeur (pl. XX, fig. 3 et 4). Ils se composent d'un noyau cylindrique en tôle sur lequel sont fixées les marches d'une hauteur de 178 *mm*. Ces noyaux, dont la hauteur correspond à celle d'un panneau, sont suspendus aux attaches des treillis sur les arbalétriers. Le raccord entre deux escaliers tournants consécutifs s'opère au moyen d'un escalier droit (Voir fig. 110 et 111 ci-contre).

Les noyaux cylindriques en tôle de 4 *mm* de diamètre intérieur (pl. XII *bis*, fig. 1 et 3) sont fixés à leur partie supérieure par une cornière circulaire de 70 × 70 × 8, sur deux poutres de 200 *mm* de hauteur qui s'attachent sur les goussets des treillis. Leur base est maintenue par une poutre composée d'une âme de 250 × 6 raidie par deux cornières de 60 × 60 × 7, qui se coude de part et d'autre pour venir s'attacher sur les entretoises horizontales des panneaux (fig. 4). C'est ce noyau formant tige de suspension qui porte l'escalier, non seulement dans sa partie héliçoïdale, mais aussi dans sa partie droite.

Les marches de 640 *mm* de largeur de l'escalier héliçoïdal sont en tôle striée ; elles sont bordées sur toute leur largeur par une cornière de 30 × 30 × 4, et assemblées sur le noyau et sur le limon par des cornières de 50 × 50 × 6. La contremarche est formée d'une âme de 208 × 4.

Les escaliers droits qui relient deux escaliers héliçoïdaux consécutifs se composent de dix marches de 0,255 *m* et de onze contremarches de 0,207 *m* de hauteur (fig. 1). Leurs limons sont des poutres en U formées d'une âme de 310 × 5 raidie sur ses bords par deux cornières de 50 × 50 × 6. Les marches en tôle striée de 285 × 5 s'y assemblent par des cornières de 50 × 50 × 6. Elles sont bordées par une cornière de 30 × 30 × 4 rivée d'autre part sur la contremarche en tôle de 237 × 4. Les garde-corps sont formés de trois lisses en fer rond de 15 et 20 *mm* supportées de distance en distance par des cornières de 60 × 40 × 6, rivées sur les limons.

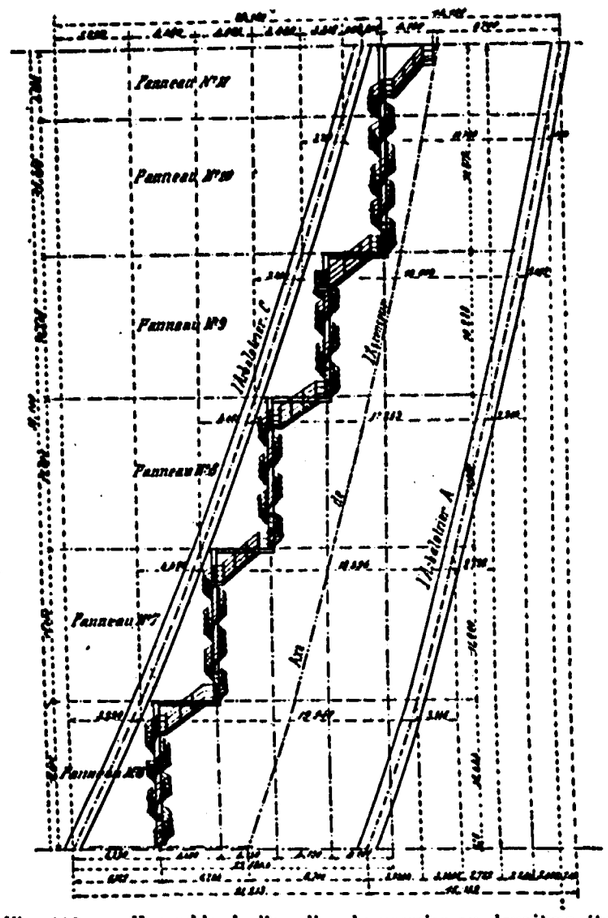


Fig. 110. — Ensemble de l'escalier du premier au deuxième étage.

c) *Escalier du deuxième au troisième étage.* — Au-dessus du deuxième étage il n'y a plus qu'un seul escalier (pl. XX, fig. 1 et 2) de 160 mètres de hauteur, interdit au public et qui est simplement un escalier de service. Il est héliçoïdal

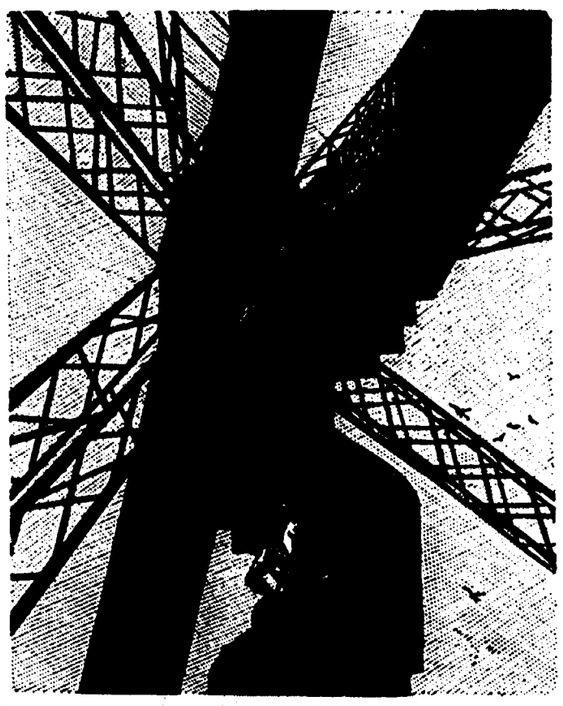


Fig. 111. — Vue de l'escalier du premier au deuxième étage.

et du même type que ceux du deuxième étage ; mais il se compose de tubes beaucoup plus longs qui reportent la charge sur le plancher du deuxième étage et le plancher intermédiaire. Il est maintenu dans chaque plan d'entretoisement par des contrefiches ; de distance en distance de petits paliers correspondant à trois marches facilitent la montée.

TABLE SPÉCIALE DÉTAILLÉE DES CHAPITRES DE LA DEUXIÈME PARTIE

Pages.

CHAPITRE I

COMPOSITION DES ÉLÉMENTS DE LA TOUR.

§ 1. — *Division en panneaux et sections* 15
§ 2. — *Sections des arbalétriers et des treillis* 15

CHAPITRE II

EFFETS DES CHARGES VERTICALES.

§ 1. — *Détermination des charges verticales* 17
1° Campanile 17
2° Panneau 29 et plancher du 3me étage 17
3° Panneaux 28, 27, 26, 25, 24, 23, 22, 21 et 20 18
4° Panneau 19 18
5° Panneaux 18, 17, 16, 15, 14, 13 et 12 18
6° Seconde plate-forme et panneau 11 19
7° Panneaux 10, 9, 8, 7 et 6 19
8° Premier étage et panneau 5 20
9° Panneaux 4, 3, 2 et 1 20
§ 2. — *Résumé des charges verticales* 21
§ 3. — *Charges verticales agissant dans les sections* 21
§ 4. — *Calcul de la partie supérieure* 22
§ 5. — *Calcul de la partie inférieure. — Méthode employée* 23
§ 6. — *Partie inférieure. — Calculs numériques* 26

CHAPITRE III

EFFORTS DUS AU VENT.

§ 1. — *Principe de la construction* 29
§ 2. — *Intensité du vent* 29
§ 3. — *Surfaces offertes au vent* 30
§ 4. — *Division en éléments* 31
§ 5. — *Surfaces des éléments. — Efforts du vent par élément et moments de renversement correspondants* 31
§ 6. — *Calculs des efforts moléculaires dus au vent dans la partie supérieure.* 32
a) Arbalétriers 32
b) Treillis 34
§ 7. — *Calculs des efforts moléculaires dus au vent dans la partie inférieure.* 35
a) Principes des calculs 35
b) Efforts de compression et efforts tranchants 36
c) Moments fléchissants 37
d) Détermination des moments parallèles à la direction du vent ... 38
e) Détermination des moments normaux à la direction du vent ... 39
f) Calcul des efforts totaux dus au vent dans les arbalétriers et coefficients de travail maximums 40
g) Calcul des efforts dus au vent dans les barres de treillis et coefficients de travail correspondants 41
§ 8. — *Hypothèse d'un vent agissant dans une direction quelconque* 42

Pages.
a) Partie supérieure 42
b) Partie inférieure 42

CHAPITRE IV

COEFFICIENTS DE TRAVAIL MAXIMUM RÉSULTANT DES CHARGES ET DU VENT.

§ 1. — *Arbalétriers* 44
a) Partie supérieure 44
b) Partie inférieure 44
§ 2. — *Treillis* 45
§ 3. — *Nouvelle hypothèse d'un vent variant de 100 à 300 kilos* 45
a) Coefficients de travail totaux correspondants dans les arbalétriers. 45
b) Efforts dans chacun des arbalétriers 46

CHAPITRE V

CALCUL DES CEINTURES ET DES POUTRES TRANSVERSALES DU PREMIER ET DU DEUXIÈME ÉTAGE, ET DES POUTRES DIAGONALES SUPÉRIEURES.

§ 1. — *Ceintures du premier étage* 48
a) Efforts de compression dus au poids de la Tour et au vent 48
b) Efforts de flexion dus aux charges et aux surcharges 48
c) Efforts totaux maximums dans les membrures et coefficients de travail 49
d) Efforts dans les barres de treillis 50
§ 2. — *Poutres transversales du premier étage* 50
a) Détermination des charges 51
b) Membrures 51
c) Treillis 52
§ 3. — *Ceintures du second étage* 52
a) Efforts de compression dus au poids propre de la Tour et au vent, dans les poutres A et C 52
b) Efforts de flexion dus aux charges et surcharges 52
c) Efforts totaux maximums dans les membrures et coefficients de travail des poutres A et C 53
d) Efforts dans les barres de treillis 53
§ 4. — *Poutres transversales* D 54
§ 5. — *Poutres diagonales supérieures* 55
a) Détermination des charges 55
b) Membrures 56
c) Treillis 57
d) Contrefiches 57

CHAPITRE VI

CALCUL DES POUTRES DES PLANCHERS DU TROISIÈME ÉTAGE, ET DE LA PLATE-FORME INTERMÉDIAIRE. — POUTRES D'ASCENSEURS.

§ 1. — *Plancher du troisième étage* 60
a) Détermination des charges 60

Pages.

b) Poutre A. ... 61
c) Poutres B et B'. ... 61
d) Poutre C. ... 61
e) Poutre D. ... 62
§ 2. — *Plate-forme intermédiaire*. ... 62
a) Détermination des charges. ... 63
b) Poutre A. ... 64
c) Poutre B. ... 64
d) Poutre H. ... 64
e) Poutre C. ... 64
f) Poutre D. ... 64
§ 3. — *Poutres d'ascenseurs*. ... 65

CHAPITRE VII

INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE. — STABILITÉ. — FONDATIONS ET FLÈCHE.

§ 1. — *Influence de la température*. ... 66
§ 2. — *Stabilité*. ... 67
§ 3. — *Charge sur les maçonneries et sur le sol de fondation*. ... 67
§ 4. — *Calcul de la flèche produite par le vent*. ... 68
a) Portion de la flèche due à la partie inférieure. ... 68
b) — — supérieure. ... 69
c) Flèche totale. ... 69
d) Calcul de la flèche pour le vent de 100 à 300 kilos. ... 69

APPENDICE

CALCUL DES SURFACES EXPOSÉES AU VENT. 71 à 74

Pages.

CHAPITRE VIII

DESCRIPTION DE L'OSSATURE.

§ 1. — *Appuis des arbalétriers*. ... 75
§ 2. — *Montants jusqu'au premier étage*. ... 75
§ 3. — *Panneau 5 et poutres du premier étage*. ... 76
a) Ensemble. ... 76
b) Panneau 5. ... 76
c) Grandes poutres. ... 76
d) Galeries. ... 76
§ 4. — *Panneaux 6 à 10*. ... 77
§ 5. — *Plancher du deuxième étage*. ... 77
§ 6. — *Panneaux 12 à 28*. ... 77
§ 7. — *Plancher intermédiaire*. ... 78
§ 8. — *Panneau 29*. ... 78
§ 9. — *Plancher du troisième étage*. ... 78
§ 10. — *Quatrième plate-forme et étage réservé*. ... 79
§ 11. — *Grandes poutres diagonales et cintres du campanile*. ... 79
§ 12. — *Phare*. ... 79
§ 13. — *Poutres de l'arc et arcs décoratifs*. ... 80
§ 14. — *Poutres d'ascenseurs*. ... 80
§ 15. — *Escaliers*. ... 81
a) Escaliers du rez-de-chaussée au premier étage. ... 81
b) — du premier au deuxième étage. ... 81
c) — du deuxième au troisième étage. ... 81

NOMENCLATURE DES PLANCHES RELATIVES A LA DESCRIPTION DE L'OSSATURE

§ 1. — Appuis des arbalétriers ...	Pl. VI, fig. 7 à 16.
§ 2. — Montants jusqu'au 1er étage.	Pl. XXXI, sections XXVIII à XXV. Pl. IX, fig. 1, 5, 8, 18, 20 à 26, 28 à 32, 34, 37 et 40. Pl. VIII, fig. 8. Pl. VII, fig. 1 à 5. Pl. X, fig. 1 à 11.
§ 3. — Panneau 5 et poutres du 1er étage. ...	Pl. VII, fig. 1. Pl. VIII, fig. 2 et 8. Pl. XVI, fig. 6 à 11. Pl. X, fig. 14 à 17, 19, 21 et 22. Pl. XI, fig. 70 à 75. Pl. XXXIV, treillis. Pl. XIII, fig. 1 à 11.
§ 4. — Panneaux 6 a 10. ...	Pl. XXXI, sections XXIII à XX. Pl. VII, fig. 1 et 2. Pl. XII, fig. 1 à 4.
§ 5. — Plancher du 2me étage. ...	Pl. XVI, fig. 12 et 13. Pl. XII, fig. 1 à 3. Pl. XVII, fig. 33, 36, 37, 41 et 43. Pl. XIII *bis*, fig. 65, 67, 78, 93 et 94.
§ 6. — Panneaux 12 a 28.	Pl. XXXI, sections. Pl. VII. Pl. XII, fig. 5. Pl. XII *bis*, fig. 8 et 19. Pl. XIII *bis*, fig. 20 à 26 et 53 à 61. Pl. VIII, fig. 13 à 22. Pl. XXIII *ter*, fig. 18, 19 et 20.
§ 7. — Plate-forme intermédiaire..	Pl. XIX, fig. 14. Pl. VIII, fig. 17. Pl. XVI, fig. 14 à 17. Pl. XVII, fig. 45 à 61.
§ 8. — Panneau 29. ...	Pl. VII, fig. 4. Pl. VIII, fig. 23 et 24. Pl. XIV, fig. 2, 6, 7, 11 à 14.
§ 9. — Plancher du 3me étage. ...	Pl. XIX, fig 3. Pl. XVI, fig. 18 et 19. Pl. XVII, fig. 62 à 84. Pl. VIII, fig. 23 et 24. Pl. XXIII*bis*, fig. 1, 2 et 17.
§ 10. — Quatrième plate-forme et étage réservé. ...	Pl. XIX, fig. 3, 6, 8. Pl. XIV, fig. 2, 4, 7 à 10. Pl. XVI, fig. 20. Pl. XVII, fig. 85 à 87.
§ 11. — Grandes poutres diagonales et cintres du campanile. ...	Pl. XIX, fig. 3, 4, 5, 8. Pl. XIV, fig. 1 à 5. Pl. VII, fig. 4. Pl. XV, fig. 2, 36 à 40.
§ 12. — Phare. ...	Pl XVI, fig. 22, 24. Pl. XV, fig. 1, 2, 36, 37, 40 et 41. Pl. XIX, fig. 4.
§ 13. — Poutres de l'arc et arcs décoratifs. ...	Pl. VII, fig. 1, 6. Pl. XI, fig. 1 à 15, 18 à 25, 33 et 35. Pl. VIII, fig. 8. Pl. V, fig. 12, 15 et 16. Pl. X, fig. 11.
§ 14. — Poutres d'ascenseurs. ...	Pl. XX, fig. 3 et 4. Pl. XXI. Pl. XXII$_3$, fig. 19 à 26. Pl. IV, fig. 23. Pl. IX, fig. 30. Pl. XXII *bis*, fig. 57 et 58. Pl. XXIII, fig. 14. Pl. XXIII *bis*, fig. 1 et 2. Pl. XXII$_{IV}$, fig. 3, 4, 5 à 20, 53, 57 et 58.
§ 15. — Escaliers. ...	Pl. XXVIII, fig. 1 à 21, 28 à 33, 37 à 44. Pl. XX, fig. 3 et 4. Pl. XII *bis*, fig. 1 à 4. Pl. XX, fig. 1 et 2.

TROISIÈME PARTIE

EXÉCUTION DES TRAVAUX

CHAPITRE I

FONDATIONS ET SOUBASSEMENTS DES PILES

§ 1. — Étude du sous-sol et choix de l'emplacement définitif.

Il résulte des nombreux sondages effectués dans le Champ-de-Mars, que l'assise inférieure de ce sous-sol est formée par la puissante couche d'argile plastique qui règne d'une manière générale dans le bassin de Paris : elle est située à 14 *m* au-dessous du sol et présente une épaisseur d'environ 16 *m*; au-dessous se trouve la craie. Cette argile est sèche, assez compacte, capable de supporter des pressions de 3 à 4 *k* par centimètre carré, mais elle est cependant d'une résistance insuffisante pour recevoir la charge directe des fondations de la Tour.

Cette couche d'argile, légèrement inclinée depuis l'École militaire jusqu'à la Seine, est surmontée d'un banc de sable et gravier compact, qui est éminemment propre à recevoir des fondations.

Jusqu'aux environs de la balustrade qui séparait le Champ-de-Mars proprement dit, appartenant à l'État, du square placé en avant, qui appartient à la Ville, c'est-à-dire à peu près à la hauteur de la rue de l'Université, cette couche de sable et gravier a une hauteur presque constante de 6 à 7 *m*, et des fondations solides peuvent, dans cette partie du Champ-de-Mars, être établies à sec sans aucune difficulté, ainsi que cela a eu lieu pour les divers palais de l'Exposition.

Au delà, on entre dans l'ancien lit de la Seine, et l'action des eaux a réduit l'épaisseur de cette couche, qui va toujours en diminuant, pour devenir à peu près nulle quand on arrive au lit actuel. C'est ce que montrent les figures 1 et 2 de la planche II.

Si l'on consulte le plan de Paris, dressé par Roussel en 1730, on peut se faire une idée de ce qu'était autrefois la forme du lit de la Seine. Le lit actuel, aux rectifications d'encaissement près, y est très nettement tracé. Mais il existait un second bras dont la berge était à peu près dans le prolongement de la rue de l'Université. Il ménageait en avant une petite île, dite « île des Cygnes », qui servait à des chantiers de bois; en arrière étaient les marais potagers du Gros-Caillou dans lesquels on devait plus tard édifier l'École Militaire. Ce bras s'envasait d'ailleurs rapidement : le plan de Berniquet (1789) l'indique encore, mais plutôt à l'état de fossé; la construction du pont d'Iéna devait en achever la disparition par un remblayage définitif.

L'emplacement en a été confirmé dans la fondation des piles 1 et 4, qui en occupent à peu près exactement le lit et qui sont situées à 120 *m* en arrière du quai actuel. Aussi en ces points on rencontre, dans une couche de vase ou d'argile plus ou moins sableuse, des débris et détritus de toute nature, bois, fragments de poteries, os d'animaux domestiques, et même une maçonnerie formée par des blocs superposés qui devaient appartenir à un mur de quai. Toute cette partie voisine de la Seine est tout à fait impropre

à recevoir des fondations faites par les procédés ordinaires, comme celles que l'on peut établir dans les parties plus reculées du Champ-de-Mars. Mais des considérations administratives ne permettaient pas d'implanter la Tour dans le domaine de l'État, ce qui eût entraîné, pour légaliser une aliénation d'une durée dépassant celle de l'Exposition, de longues formalités. On les évita en plaçant la Tour dans le square, qui était le domaine de la Ville, et en obtenant à cet effet l'autorisation du Conseil municipal. Celui-ci, en retour, demanda qu'à l'expiration de la concession, la Tour devînt la propriété de la Ville.

Quant à sa position même dans le square, on n'eut pas le choix. Certaines préférences existaient pour placer la Tour sur le quai lui-même, de manière à l'éloigner le plus possible des bâtiments de l'Exposition et à diminuer les inconvénients d'aspect que l'on craignait pour eux de ce voisinage. Mais on reconnut bien vite qu'aux environs du quai, la couche de sable et gravier disparaissant complètement, la fondation devenait à peu près impossible. On se décida donc à l'éloigner de la Seine autant que le permettaient les limites du square.

Les deux piles arrière furent ainsi placées à cheval sur la balustrade de séparation, sur un terrain facile, et les deux piles en avant pouvaient venir se fonder sur le banc de sable et gravier, qui avait encore en ce point, au-dessus de l'argile, une épaisseur de 3,50 *m*, laquelle offrait toute sécurité (1).

§ 2. — Fondation de la pile 2.

Les deux piles d'arrière, qui portent les numéros 2 et 3, sont placées, ainsi que nous venons de le dire, près de l'ancienne balustrade, à 2 16 *m* en arrière du mur du quai. Le sol naturel est en ce point à la cote + 34, les terrains d'apport de toute nature et les remblais inconsistants dont il est formé ont une épaisseur de 7 *m*. On rencontre à la cote + 27, qui est le niveau normal de la Seine (retenue du barrage de Suresnes), la couche de sable et gravier dont l'épaisseur en ce point est de 6 *m* environ. On a donc pu, sans épuisement, obtenir pour ces deux piles une fondation parfaite.

Les travaux furent inaugurés, le 26 janvier 1887, par le commencement des fouilles de la pile 2 (Pl. II, fig. 4, 5 et 6). Une fouille générale fut faite jusqu'à la cote + 29 suivant les procédés habituellement employés pour les fouilles des édifices parisiens, c'est-à-dire à l'aide de tombereaux accédant au fond de la fouille par des rampes convenablement disposées, venant se charger au droit d'un large front d'attaque et transportant le déblai aux décharges publiques.

Ce travail, qui comprenait le transport au loin de 5.351 m^3, fut terminé le 23 février et marcha avec une grande activité sous la direction de MM. Aubry et Huguet, entrepreneurs. Par certaines journées, on chargeait 350 tombereaux à deux chevaux portant 2,50 m^3, et 40 tombereaux à un cheval portant 1,50 m^3.

On fit ensuite, en régalant les terres sur la plate-forme de la fouille générale, le déblai pour la fondation des quatre massifs de maçonnerie supportant chacun des arbalétriers. On donna à ces excavations une profondeur de 2,00 *m* qui permettait d'atteindre la couche de gravier solide au niveau de l'eau (+ 27,10). Ces excavations, qui devaient être remplies de béton, avaient, pour trois des massifs, 10 *m* sur 6; le quatrième, de forme spéciale, qui devait recevoir les chemins d'ascenseur, avait 14 *m* sur 7,40 *m*. Leur cube était de 492 m^3.

Chaque pile était entourée par des murs servant de fondation au soubassement en maçonnerie qui constituait la base apparente de chacune d'elles. Ces murs étaient établis sur des voûtes qui reposaient soit sur les massifs eux-mêmes, soit sur des piliers distincts fondés sur la couche de gravier. Ces fouilles avaient un cube de 90,50 m^3.

Enfin on avait décidé, pour faciliter la déperdition de l'électricité atmosphérique dans le sol, de disposer à 3 *m* sous la plate-forme, soit à 1 *m* sous le niveau de la Seine, deux longs tuyaux en fonte de 20 *m* environ de longueur et de 0,50 *m* de diamètre, disposés entre les massifs. L'une de leurs extrémités devait se recourber verticalement et émerger au niveau du sol naturel pour être reliée par des conducteurs métalliques aux fers de la Tour. Ces fouilles, qui comportaient des dragages et des étaiements, avaient

(1) Nota. — L'emplacement de ces deux dernières piles était traversé par un égout qui fut dévié, dès l'origine des travaux, sur une longueur de 200 mètres environ. Ce travail, exécuté par MM. Manoury et Grousselle, au début même des travaux, a entraîné une dépense de 16.000 francs.

1 *m* à la base et 3 *m* de profondeur. Leur cube a été de 144 m^3. Après le placement des tuyaux conducteurs, elles ont été remblayées.

Les fouilles des massifs et des murs étant terminées, on procéda à leur remplissage par du béton hydraulique formé par 1 m^3 de cailloux roulés et 0,50 m^3 de mortier. Celui-ci était lui-même constitué par 1 m^3 de sable de rivière et 250 *kg* de ciment de Boulogne (marque Famchon). Le mortier était fabriqué par des broyeurs mécaniques et coulé en place par des bétonnières verticales à tringles entre-croisées. — Le cube du béton employé a été de 582 *m*.

Une fois que l'on eut arasé le béton à la cote + 29, on le surmonta par les maçonneries supérieures.

Les massifs sous les arbalétriers avaient la forme d'un tronc de pyramide quadrangulaire dont l'axe était dirigé suivant l'inclinaison oblique des arbalétriers, ou plutôt était tel que la courbe des pressions vînt à peu près couper dans leur milieu les plans des assises. Ces assises elles-mêmes étaient horizontales dans la partie inférieure, et normales à la courbe des pressions dans la partie supérieure afin d'éviter tout glissement. Le raccordement se faisait par des assises en éventail. Les faces antérieures et latérales étaient disposées verticalement avec des redans, la face postérieure était inclinée. La figure 1 de la planche IV indique ces dispositions. La hauteur maxima était de 7,50 *m* et la largeur à la base de 5,00 *m*.

Ces massifs étaient constitués par du moellon des carrières de Souppes, hourdé en mortier hydraulique à raison de 250 *kg* de ciment de Boulogne par mètre cube de sable.

Toute cette maçonnerie, dans laquelle on n'a fait entrer que des matériaux de première qualité, a été faite avec un soin extrême, de manière que, même chargée de suite après son établissement, elle ne donnât lieu à aucun tassement ; c'est pour ce motif, du reste, que l'emploi de la chaux, dont la prise au milieu des gros massifs est incertaine comme durée, a été écarté. Nous avons seulement employé celle-ci pour les murs de pourtour, qui pouvaient sans aucun inconvénient être construits, suivant l'usage, avec du mortier de chaux.

Le massif en avant du côté du centre avait une forme un peu spéciale, indiquée par la figure 1, pour recevoir les cages d'ascenseurs.

La face inclinée qui limite la partie supérieure de chaque massif recevait les pierres de taille d'appuis, composées de deux assises hexagonales ayant chacune une épaisseur de 0,50 *m* et une largeur de 4,00 *m* pour la première et 3,00 *m* pour la seconde. Ces pierres provenaient des meilleurs bancs des carrières de Château-Landon et leur résistance à l'écrasement est, d'après les expériences que nous avons demandées à l'École des ponts et chaussées et au Conservatoire des arts et métiers, de 1.235 *kg* en moyenne par cm^2. Ce sont ces pierres qui reçoivent les sabots en fonte sur lesquels viennent reposer les arbalétriers.

Au centre de chacun de ces massifs, sont noyés deux grands boulons d'ancrage de 7,80 *m* de longueur et de 0,10 *m* de diamètre qui, par l'intermédiaire de sabots en fonte et de fers à double T, intéressent la majeure partie des maçonneries des massifs.

Cet ancrage, qui n'est pas nécessaire pour la stabilité de la Tour, laquelle est assurée par son poids propre, donne cependant un excès de sécurité contre tout renversement et devait être, de plus, utilisé lors du montage en porte à faux des piliers en fer. Ces boulons ne sont pas simplement noyés dans la maçonnerie, où leur position eût été invariable. Ils sont logés dans un tuyau en fonte dans l'intérieur duquel ils peuvent avoir un petit déplacement. En effet, quel que fût le soin avec lequel on devait procéder au placement des boulons qui devaient fixer les sabots d'appui, un peu de jeu était nécessaire pour obtenir la position rigoureuse, prévue aux dessins, de la partie métallique.

Les trois massifs latéraux cubent chacun 196,50 m^3 ; celui des ascenseurs 358,68 m^3, soit ensemble 948,15 m^3. Chacun des couronnements en pierre de taille cube 9,845 m^3, soit 39,38 m^3 pour les quatre.

Les murs de pourtour (Pl. V, fig. 3 et 4) de 0,75 *m* d'épaisseur furent établis en maçonnerie de chaux hydraulique d'Echoisy, sur des piliers réunis par des arcades de 5,55 *m* de corde, et 1,00 *m* de flèche. Ils ont été arasés à la cote + 35, niveau du sol définitif du Champ-de-Mars. Leur cube est de 316 m^3.

Quand le tout fut terminé, on noya les maçonneries dans un remblai rapporté jusqu'au niveau du sol. Le cube de ce remblai est de 4.170 m^3.

La maçonnerie a été commencée le 4 mars et terminée le 10 avril. Le nombre d'hommes qui y travaillait a été en moyenne de 47, dont 20 maçons et 27 manœuvres.

§ 3. — Fondations de la pile 3.

La fouille de cette pile a été faite différemment de celle de la pile 2. Les déblais ne devaient plus être transportés aux décharges publiques, mais être approvisionnés dans la partie centrale de la Tour, afin soit de relever le niveau du Champ-de-Mars, qui formait une dépression en cet endroit, soit de remblayer les vides autour des massifs de maçonnerie. Ils ont été transportés à l'aide de wagonnets traînés par des chevaux, et roulant sur deux voies qui les amenaient aux points voulus (Pl. III, fig. 1).

La fouille, qui avait les mêmes dimensions que la précédente, a été creusée à la même profondeur, soit à la cote + 29,00.

Elle a été commencée quelques jours après la première, le 29 janvier, et terminée le 8 mars, soit au bout de trente-neuf jours, délai un peu plus long que le premier, parce qu'on disposait d'attaques bien moins puissantes qu'avec les nombreux tombereaux qui se présentaient au chargement. Le cube de cette fouille était de 5.498 m^3.

Les petites fouilles pour le béton des massifs, celui des murs de pourtour et pour la pose des conduites d'électricité ont été faites du 1er au 12 mars; leur cube était de 741 m^3.

Les maçonneries étaient semblables aux premières en ce qui concernait les massifs; les murs de pourtour étaient seuls différents. En effet, l'intérieur de cette pile devait rester vide pour recevoir le service mécanique de la Tour, comme générateurs, machines, pompes, dynamos pour l'éclairage, etc.

Ces murs de pourtour (Pl. III, fig. 4; Pl. IV, fig. 13 et 14; Pl. V, fig. 5 et 6) ont 1,50m à la base et 0,75 m au sommet. Ils se relient aux massifs et reposent en outre sur des piliers de béton par des arcades de 5,00m et 3,36m placées à la partie inférieure, d'où ils s'élèvent pleins sur une hauteur de 6 m.

Un remblayage fut fait ensuite derrière les massifs et les murs. Le sol lui-même, qui devait être celui de la salle des machines, fut relevé jusqu'à la cote + 30,50.

Ces fondations ont été commencées le 9 mars et terminées fin avril.

§ 4. — Puits de sondage des piles 1 et 4.

Pour la reconnaissance exacte du terrain difficile sur lequel devaient être fondées les piles du bord de l'eau, portant les numéros 1 et 4, nous avions d'abord fait usage des procédés de sondage ordinaires, exécutés par MM. Paulin et Arrault. Mais leurs résultats, pleins d'incertitude, ne nous ont pas donné complète satisfaction.

Quelles conclusions au point de vue de l'établissement d'une fondation peut-on raisonnablement baser sur l'examen de quelques décimètres cubes de déblai, délayés le plus souvent par les eaux auxquelles le trou de sonde lui-même a donné accès et ramenés au jour par la cuillère de sondage? Quelle consistance a ce terrain dans son état naturel et quelle charge peut-on lui faire supporter? Les résultats du sondage ne donnent aucune indication à cet égard et sont la cause dans les travaux de fréquentes erreurs ayant les conséquences les plus graves.

Comme il était d'un grand intérêt, pour l'organisation du travail et la préparation des hausses, de connaître à l'avance non seulement la profondeur de la couche du sol où l'on devait s'arrêter, mais encore la nature exacte du sous-sol, nous n'avons pas hésité à faire pour chacune de ces piles des puits à l'air comprimé destinés à nous renseigner d'une manière complète soit sur l'épaisseur des couches, soit sur leur consistance.

Nous avons été peut-être les premiers à employer ce mode de recherches, qui nous a donné les meilleurs résultats et qui au fond est très peu coûteux, quand on dispose d'un matériel à air comprimé, c'est-à-dire d'un sas et d'une machine soufflante.

Nos puits étaient constitués par un tube en tôle de 2,00m de diamètre et de 3 mm d'épaisseur. A la partie inférieure est disposée la chambre de travail surmontée de la cheminée, au sommet de laquelle s'installe le sas. L'espace vide annulaire au-dessus du plafond de la chambre sert de magasin pour le contre-poids destiné à équilibrer la pression. Ce contre-poids peut être constitué soit par des fers, soit par du caillou ou du béton, comme nous l'avons fait à ces puits. Nous devions, en effet, les laisser en place pour en faire les conducteurs de l'électricité atmosphérique, en les reliant aux fers de la Tour.

Comme la fouille générale de la pile 1 n'était pas terminée, nous avons disposé ce cylindre en dehors de la pile et nous l'avons enfoncé à partir du sol naturel. On employa d'abord les procédés ordinaires des puisatiers jusqu'à ce que l'on fût arrêté par l'eau, soit à la cote + 27,00 environ, à 7,43 *m* au-dessous du sol naturel (+ 34,53). — On y installa alors le sas et ses cheminées et on descendit en sept jours de 7,07 *m* donnant une descente totale de 14,50 *m*. On était alors dans le calcaire chlorité et, comme on éprouvait quelques difficultés à charger assez le tube pour le faire descendre, on fit un sondage supplémentaire à la tarière de 1,40 *m* pour reconnaître l'argile, dont la présence très nette fut indiquée à la cote + 18,63 (voir fig. 3, Pl. II).

On avait rencontré dans l'intervalle une couche de remblais de 7,43 *m*, des argiles sableuses et du sable fin sur une épaisseur de 5,99 *m* et enfin une couche de sable et gravier compact excellent pour fondations à la cote + 22, séparée de l'argile, soit par la couche elle-même, soit par du calcaire chlorité, sur une épaisseur de 3,37 *m*. On pouvait donc sans inconvénient s'asseoir sur cette couche.

Pour la pile 4, la fouille générale était déjà opérée et on put établir le puits de sondage au centre des quatre caissons en commençant les opérations d'enfoncement à la cote + 28. Le sol naturel était à la cote + 34,60.

L'enfoncement fut poussé cette fois jusqu'à une pénétration de 1,75 *m* dans l'argile plastique, dont on reconnut nettement la nature et la compacité, qui était assez grande : cette argile était sèche, très résistante et pouvait déjà par elle-même supporter des charges de 3 à 4 *k* au moins par centimètre carré. On avait rencontré des sables argileux et des vases sableuses sur une hauteur de 6,00 *m*, puis la bonne couche de sable et gravier à la cote + 22, séparée de l'argile par une épaisseur de 3,15 *m* de gravier, de calcaire chlorité et de grès ferrugineux. Cette couche pouvait donc avec pleine sécurité recevoir les fondations, dont la charge par centimètre carré n'excédait pas 4,9 *k*, ainsi qu'il résulte des calculs qui précèdent.

Nous avons donc pu, par ce mode très sûr, que nous ne saurions trop recommander, déterminer à l'avance d'une façon absolue l'organisation de notre travail, de nos approvisionnements comme hausses, matériaux de maçonnerie, etc.

Le prix d'un tel sondage est d'environ 2.800,00 fr. comprenant :

Caisson proprement dit.....	1.800 francs.
Main-d'œuvre, frais de machine et fournitures diverses.....	1.000 —

Le caisson peut au besoin être en grande partie retiré pour être utilisé à nouveau. Dans le cas actuel, nous l'avons laissé en place, en retirant seulement les cheminées. Elles ont été remplacées par un tuyau vertical en fonte débordant au dehors, et plongeant largement dans l'eau. Les vides étaient remplis par des cailloux ; on avait ainsi un conducteur d'électricité ne laissant rien à désirer.

Étant donnée cette faible hauteur de 5,00 *m* à descendre sous l'eau, on peut se demander s'il n'y aurait pas eu, au point de vue de la dépense, avantage à employer pour ces deux piles un mode différent de celui de l'air comprimé et à procéder par dragage dans une enceinte avec béton immergé.

Le doute n'est guère possible : car, malgré les sondages, on n'était pas, dans cette partie si tourmentée du sol du Champ-de-Mars, suffisamment sûr du terrain pour toute la surface englobée dans les pieds. Il fallait donc, dans ces circonstances, adopter une solution répondant à toutes les éventualités. De plus l'emploi de l'air comprimé présente de tels avantages, soit comme sûreté dans le travail, soit comme certitude dans le résultat obtenu, qu'en raison de l'immense intérêt que l'on avait à marcher aussi rapidement que possible en se débarrassant de suite de tout aléa et à établir des fondations ne donnant absolument aucune crainte pour l'avenir, on n'a pas hésité à employer ce procédé, quoiqu'il fût sensiblement plus coûteux que tout autre. Ce choix a d'ailleurs été pleinement justifié par la suite, car on a rencontré dans les caissons de la pile 1 des restes considérables de maçonnerie et des troncs d'arbres qui auraient été un obstacle très sérieux à la prompte exécution du travail par d'autres procédés.

§ 5. — Fondation de la pile 4.

On commença, comme pour les autres piles, à établir une fouille générale de 6,00 *m* de profondeur à la cote + 28,00. Le terrain naturel était à la cote + 33,92 (voir Pl. II, fig. 12 et 13).

La partie supérieure de cette fouille, jusqu'à une profondeur de 4,00 *m* environ, a été enlevée au tombereau pour être transportée aux décharges publiques, suivant le mode employé à la pile 2. On enleva ainsi 4 748 *m*³. Pour les 2,00 *m* restants, dont le déblai devait être mis en dépôt dans la partie centrale de la Tour, on fit une cunette descendant à la cote + 28,00 et traversant la fouille. On la relia à une rampe sur laquelle fut posée une voie, et à l'extrémité de laquelle était disposé un monte-charge à câble incliné, mû

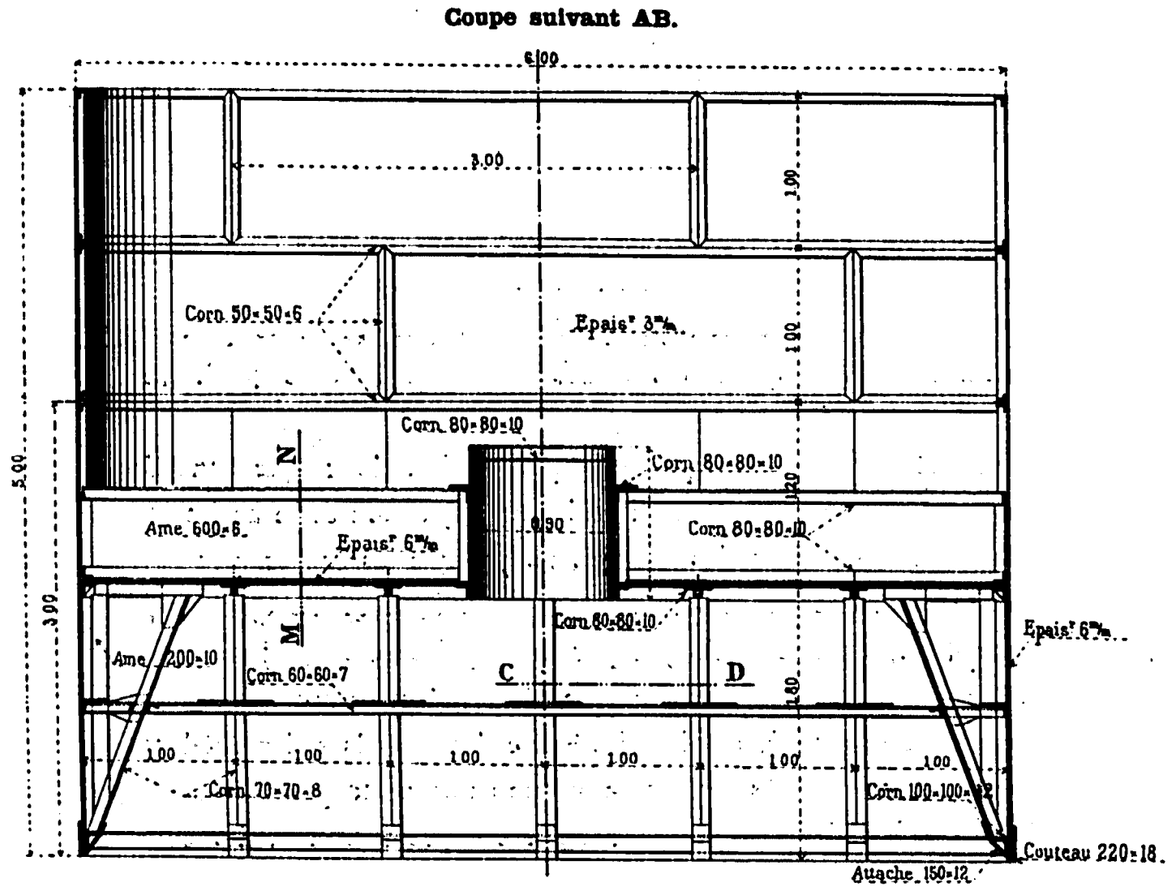


Fig. 112.

par une locomobile. Les wagons venaient se charger le long de la cunette et se déversaient de part et d'autre de la voie de dépôt (Pl. III, fig. 1). On enleva par ce procédé 2.421 *m*³.

Ce dernier mode de travail n'était pas très expéditif, aussi la fouille, commencée dans les premiers jours de février, ne fut-elle terminée que le 25 mars; elle comportait 7.169 *m*³.

On fit, à l'emplacement des caissons et jusqu'au niveau de l'eau, les excavations nécessaires pour les loger; elles avaient une surface de 15 *m* sur 6 *m*.

On commença, le 26 mars, le montage de ces caissons; leur longueur était de 15,24 *m* et leur largeur de 6,00 *m* avec coins arrondis (le premier construit avait une longueur de 14,24 *m* seulement; mais nous avons cru bon d'allonger tous les autres de 1,00 *m*).

La hauteur de la chambre de travail, mesurée du tranchant au plafond était de 1,80 *m* (voir fig. 112). Les parois verticales dépassaient le plafond de 1,20 *m*, ce qui leur donnait une hauteur de 3,00 *m*; elles étaient raidies de mètre en mètre par des consoles-contrefiches en cornières, ayant 0,80 *m* à la partie supérieure.

Tous les joints étaient verticaux; ils étaient situés au droit des consoles et recouverts par des couvre-joints. La muraille entière était livrée au chantier divisée en huit tronçons, dont chacun portait ses consoles intérieures complètement rivées à l'avance : ceux des grands côtés n'avaient pas moins de 7,00 *m* de longueur.

Les tôles de muraille avaient 6 *mm* d'épaisseur, elles étaient raidies à leur partie inférieure par un fer plat de 220 × 18 *mm* d'épaisseur formant couteau et une cornière saillante de 100 × 100 formant appui pendant l'intervalle des descentes. Le plafond était formé par une tôle de 6 *mm* d'épaisseur, raidie de mètre en mètre par des

Fig. 113.

poutres en tôle et cornières de 0,60 *m* de hauteur, qui venaient se river sur les consoles. Chacun des tronçons du plafond portait deux de ces poutres rivées à l'avance, le joint se faisait dans l'intervalle de deux poutres.

Cette division en tronçons avait pour but de réduire au minimum le nombre de rivets à poser sur place. Le montage était, de plus, très facile : on montait sur des tréteaux les tronçons de plafond, puis on mâtait avec des crics les tronçons des parois opposées qui venaient s'appliquer contre le plafond : on procédait de suite à la rivure. Le montage d'un caisson complet, ainsi préparé à l'atelier, ne durait que deux jours.

Deux des tronçons du plafond portaient des ouvertures circulaires de 0,90 *m* de diamètre sur lesquelles s'adaptaient les viroles de tôle dites *cheminées*, qui supportaient les chambres d'équilibre ou sas.

Les hausses, rivées au fur et à mesure de l'enfoncement des caissons, étaient formées par des tôles de 3 *mm* et de 1,00 *m* de hauteur.

Chacun des caissons muni de ses deux rangs de hausses pesait 30.756 *k*.

Le sas, de notre type habituel (fig. 113), avait 2,00 *m* de diamètre et 2,00 *m* de hauteur. Il était constitué par un cylindre en tôle d'acier fermé par deux calottes, dont l'inférieure s'adaptait sur la cheminée. Il portait deux trompes formant écluses à déblais et il était muni d'une porte pour la sortie des ouvriers. Les déblais étaient montés dans des bennes en tôle à l'aide d'un treuil mû du dehors par des hommes installés dans une légère plate-forme portée par le sas.

La pompe à air, actionnée par une locomobile de 15 chevaux, était placée dans un hangar sur la berge ; l'air arrivait par des tuyaux de caoutchouc venant s'adapter à la partie inférieure du sas. L'éclairage général du chantier était fait pendant la nuit par des lampes à arc ; l'intérieur du caisson était également éclairé à l'électricité.

Avant d'envoyer l'air comprimé, on remplissait par de la maçonnerie de briques hourdée en ciment l'intervalle des consoles ; puis on déblayait à l'air libre dans l'intérieur du caisson à l'aide d'un treuil de puisatier et de seaux, tout le terrain que l'on pouvait enlever sans être incommodé par l'eau. Enfin on montait les cheminées et les sas et on procédait comme d'habitude, suivant les procédés qui sont trop connus pour que nous les décrivions ici.

Nous dirons seulement que le remplissage au-dessous de la chambre de travail, comme dans la chambre elle-même, était fait en béton de ciment à 250 *kg* par mètre cube de sable.

Nous résumons dans le tableau ci-dessous les données relatives à cette exécution, telles qu'elles résultent des attachements :

Éléments relatifs à la Pile N° 4.

DÉSIGNATION.		CAISSON N° 1.	CAISSON N° 2.	CAISSON N° 3.	CAISSON N° 4.	TOTAUX.
Montage du caisson	Commencement	26 mars.	29 mars.	31 mars midi.	3 avril.	»
	Fin	28 mars.	31 mars.	2 avril soir.	6 avril.	»
	Durée	2 jours.	2 jours.	2 jours 1/2	3 jours.	»
Fonçage	Commencement	11 avril 6 h. m.	18 avril 6 h. s.	22 avril 6 h. s.	2 mai 6 h. m.	»
	Fin	16 avril 6 h. s.	20 avril midi.	28 avril midi.	11 mai minuit.	»
	Durée	132 h.	186 h.	141 h.	224 h.	683 h.
Bétonnage de la chambre de travail.	Commencement	17 avril 6 h. m.	27 avril 6 h. m.	29 avril 6 h. m.	12 mai 9 h. m.	»
	Fin	18 avril midi.	28 avril midi.	30 avril midi.	13 mai midi.	»
	Durée	30 h.	30 h.	30 h.	27 h.	117 h.
Surface du caisson		84,60 m^2	90,40 m^2	90,40 m^2	90,40 m^2	»
Cote de la fouille		27,24 *m*	27,40 *m*	27,23 *m*	28,15 *m*	»
Cote du tranchant		23,38	21,81	22,34	21,72	»
Cote du fond définitif		23,58	22,01	22,54	21,92	»
Descente totale		3,66	5,39	4,69	6,23	»
Cube extrait à l'air libre		98,14 m^3	148,58 m^3	169,42 m^3	163,98 m^3	580,12 m^3
» » comprimé		211,00	339,75	255,49	400,45	1206,69
Cube total extrait		309,14	488,33	424,91	564,43	1786,81
Descente à l'air comprimé		2,50 *m*	3,75 *m*	2,82 *m*	4,42 *m*	»
» moyenne par 24 heures		0,55	0,48	0,48	0,48	»
Cube du béton et mortier de ciment arasé à la cote +28		400,45 m^3	542,69 m^3	494,68 m^3	550,85 m^3	1988,67 m^3

Sur le béton arasé à la cote + 28, on éleva de suite les massifs en maçonnerie devant supporter les arbalétriers. Ils étaient semblables comme forme et dimensions à ceux des piles 1 et 3, sauf que, partant de la cote +28 au lieu de celle de + 29, ils avaient un mètre de hauteur en plus. Pour les trois massifs semblables, la largeur à la base était toujours de 5,00 *m*, mais la hauteur au point le plus élevé étant de 8,50 *m*, la longueur à la base était de 9,61 *m*.

Quant au massif central recevant l'ascenseur Combaluzier, au lieu d'avoir 7,40 *m* comme à la pile 2, on put lui conserver la largeur de 6,00 *m* comme aux autres et ne pas augmenter la largeur du caisson ; à cet effet on remplaça les murs latéraux par une ossature en fer avec voûtes en briques de 0,22 *m* d'épaisseur. Elle est formée par des fers à T verticaux de 0,30 *m* de hauteur et distants de 1,60 *m*. Ces fers sont réunis à leur partie supérieure par une poutre en tôle et cornières de 0,50 *m* de hauteur disposée horizontalement. La forme de ce massif, dont le vide reçoit la cage de l'ascenseur, est donnée par les figures 31 à 34 de la planche IV.

Quant aux murs de pourtour (Pl. V, fig. 7 à 10), ils sont établis avec des arcades sur des piliers, dont la maçonnerie commence à la cote + 28, sans soubassement de béton.

Le cube de chacun des trois massifs semblables est de 242,66 m^3, soit pour les trois 727,98 m^3.

Celui du massif central est de 374,42 m^3, celui du remplissage en briques de 23,51 m^3. Le poids du fer de l'ossature est de 4.238 *kg*.

Le cube des murs du pourtour hourdés à la chaux hydraulique est de 355,70 m^3.

Après l'achèvement des maçonneries, le remblayage général fut fait par 4.218 m^3 de terres prises dans les déblais en dépôt.

L'ensemble du travail fut terminé le 16 juin 1887.

§ 6. — Fondation de la pile N° 1.

Cette fondation est analogue à celle de la pile 4, et nous serons, pour éviter les répétitions, très brefs à ce sujet. (Voir fig. 10 et 11 de la Pl. II, — fig. 1, 2, 5 de la Pl. III, — fig. 9, à 12, 23 à 30 de la Pl. IV.)

La cote moyenne du sol étant d'environ + 34,00, la fouille générale, arasée à la cote + 28,00 a été terminée le 9 avril. La partie supérieure, à laquelle on accédait par une rampe, a été transportée par des tombereaux aux décharges publiques. Le cube était de 3.081 m^3.

La partie inférieure a été mise en dépôt entre les pieds de la Tour; elle a été montée à la hauteur nécessaire par un plan incliné à double voie installé dans la rampe. Au sommet était un monte-charges actionné par des chevaux. De là des voies mobiles transportaient les wagonnets à l'endroit voulu. Le cube ainsi transporté a été de 3.953 m^3.

Les caissons étaient semblables à ceux de la pile 4 et avaient une superficie de 15,24 *m* sur 6,00 *m*; ils ont été descendus à la même profondeur moyenne, soit à la cote + 22. Le fonçage du 1er caisson (N° 3) a commencé le 29 avril et le bétonnage du dernier caisson (N° 2) a été fini le 30 mai. Le fonçage et le bétonnage des quatre caissons de cette pile se sont donc faits dans le temps extrêmement court de un mois. Aucun autre procédé que celui de l'air comprimé n'eût permis de mener ce travail aussi rapidement et aussi sûrement.

Nous résumons dans le tableau ci-dessous les données relatives à chacun de ces caissons N^{os} 3 - 1 - 4 - 2.

Éléments relatifs à la Pile N° 1.

DÉSIGNATION.		CAISSON N° 3.	CAISSON N° 1.	CAISSON N° 4.	CAISSON N° 2.	TOTAUX.
Montage du caisson	Commencement	9 avril midi.	15 avril 6 h. m.	18 avril 6 h. m.	12 avril 6 h. m.	»
	Fin	11 avril soir.	17 avril soir.	20 avril soir.	14 avril soir.	»
	Durée	2 jours 1/2.	2 jours.	2 jours.	2 jours.	»
Fonçage	Commencement	29 avril 9 h. m.	6 mai minuit.	17 mai midi.	21 mai midi.	»
	Fin	9 mai minuit.	16 mai minuit.	23 mai minuit.	28 mai minuit.	»
	Durée	255 h.	240 h.	156 h.	180 h.	831 h.
Bétonnage de la chambre de travail.	Commencement	10 mai 9 h. m.	17 mai 9 h. m.	24 mai 10 h. m.	29 mai 6 h. m.	»
	Fin	10 mai soir.	18 mai 6 h. s.	25 mai 5 h. s.	30 mai 2 h. s.	»
	Durée	39 h.	33 h.	31 h.	32 h.	135 h.
Surface du caisson		90,40 m^2	90,40 m^2	90,40 m^2	90,40 m^2	»
Cote de la fouille		28,00 *m*	28,00 *m*	28,00 *m*	28,00 *m*	»
Cote du tranchant		22,22	21,80	21,99	21,55	»
Cote du fond définitif		22,42	22,00	22,19	21,75	»
Descente totale		5,58	6,00	5,81	6,25	»
Cube extrait à l'air libre		111,44 m^3	90,60 m^3	241,90 m^3	250,98 m^3	694,92 m^3
» » comprimé		394,11	453,00	284,49	315,29	1446,89
Cube total extrait		505,55	543,60	526,39	566,27	2141,81
Descente à l'air comprimé		4,35 *m*	5,00 *m*	3,14 *m*	3,48 *m*	»
Descente moyenne par 24 heures		0,40	0,50	0,48	0,46	»
Cube du béton et mortier de ciment arasé à la cote +28		505,55 m^3	543,60 m^3	526,39 m^3	566,27 m^3	2141,81 m^3

Les massifs latéraux et le massif arrière étaient semblables à ceux de la pile 4. Il en était de même pour le massif central, qui devait recevoir l'ascenseur Otis. Les maçonneries de cette pile furent terminées dans les derniers jours de juin.

§ 7. — Ensemble des fondations.

Les détails qui précèdent donnent tous les renseignements nécessaires sur cette importante partie du travail. Il n'est pas sans intérêt de les résumer dans leur ensemble.

Le travail, commencé le 26 janvier 1887, a été terminé le 30 juin suivant. Il a donc été exécuté dans le temps relativement court de 5 mois.

Les fouilles ont comporté 30.973 m^3, se décomposant ainsi :

Transportés aux décharges publiques		13.272 m^3
Mis en dépôt entre les pieds de la Tour	12.305	
Approvisionnés sur les berges	1.553	
Extraits des caissons (dont 1.190 à l'air libre)	3.843	17.701
		30.973 m^3
Les reprises de terre pour remblayer les piles se sont élevées à		13.898 m^3

Ce dernier chiffre semble excessif et peut être critiquable au premier abord ; on peut se demander s'il convenait de procéder, comme nous l'avons fait, par des fouilles générales descendant à la cote + 29 pour les piles 2 et 3 et + 28 pour les piles 1 et 4, ou s'il n'aurait pas été plus économique de faire des fouilles isolées aux points précis où la maçonnerie devait être établie. Nous ne croyons pas qu'une telle critique serait fondée.

En effet, en laissant autour des murs ou des piliers la place nécessaire pour en effectuer commodément la construction, on ne pouvait arriver à un cube moindre que 20.000 m^3. Ce cube, comparé à celui de 31.000 m^3 réalisé donne un excédent de 11.000 m^3.

Ces 11.000 m^3 ont été payés : 1,40 *fr* par mètre pour le déblai et 0,50 *fr* pour le remblayage, soit en tout 1,90 *fr*, le mètre cube, ce qui entraîne une dépense de 21.000 *fr*. Or nous estimons que cette dépense supplémentaire est bien au delà compensée par la rapidité et la facilité du travail soit des fouilles, soit de la maçonnerie, ainsi que par l'absence d'étaiements difficiles et dangereux et enfin par la plus-value qu'aurait entraîné le montage des déblais extraits des puits. Nous croyons donc que la méthode employée était la bonne et qu'elle doit être recommandée sans hésitation pour des cas analogues.

Quant aux maçonneries, elles comportent :

Maçonnerie de pierre de taille hourdée en ciment	157 m^3
» de moellons de Souppe avec mortier de ciment	3.919
Béton de ciment pour fondations ordinaires des massifs	982
» dans les caissons	4.130
Maçonnerie de moellons avec mortier de chaux hydraulique	1.619
Béton de chaux pour fondation des murs	1.639
Maçonnerie de briques	47
Total	12.493 m^3
dans lesquelles il est entré	1.000 tonnes de ciment.
et	210 tonnes de chaux.

Le travail s'est effectué avec une grande régularité, sous la direction de M. Martin comme chef de service, de M. Alalinarde comme contremaître-tâcheron pour les maçonneries et de M. Saint-Martin comme contremaître du travail des caissons.

§ 8. — Pression dans les maçonneries et sur le sol.

On a vu dans les calculs (Pl. XXXIV) que la pression maxima sur un arbalétrier est :

Par le poids seul	723.750 *kg*
Par le poids et le vent	1.075.250

Ces pressions se reportent sur la maçonnerie de pierre de taille par un sabot en fonte formant un carré de 1,80 *m* de côté avec coins arrondis.

La surface de ce sabot est de 2,96 m^2.

La surface de la pierre en contact avec le sabot supporte donc une pression de

Sous le poids seul	24,5 *kg* par cm^2
Sous le poids et le vent	35,6 »

A la partie inférieure de la pierre de taille, la surface est de 4,10 *m* sur 4,00 *m* soit 16,40 *m²*. La surface supérieure du moellon supporte donc une pression de :

Sous le poids seul	4,40 *kg* par *cm²*
Sous le poids et le vent	6,55 »

Cette pression va rapidement en diminuant dans l'intérieur du massif : vers son milieu, on peut admettre une surface normale de 6,00 *m* sur 4,60 *m* soit 27,60 *m²*. La charge unitaire n'est que de :

Sous le poids seul	2,00 *kg* par *cm²*
Sous le poids et le vent	3,90 »

Enfin au sol, elle a été exactement calculée et elle est pour les piles 2 et 3 (voir Pl. XXXIV) de

Sans le vent	4,2 *kg*
Avec le vent	5,4

Pour les piles 1 et 4 :

Sans le vent	4,1 *kg*
Avec le vent	4,9

Ces charges présentent la plus grande sécurité et montrent que les maçonneries de fondation ont été largement traitées de manière à ce qu'aucun tassement ne fût possible et qu'il n'a été rien épargné, soit comme dimensions, soit comme qualité des matériaux, pour écarter toutes craintes à cet égard.

§ 9. — Soubassements.

Quoique les soubassements apparents des piles élevés au-dessus des murs de pourtour aient été faits longtemps après le commencement du montage de la Tour, pour lequel ils eussent été une gêne, nous donnerons tout de suite, pour compléter tout ce qui est relatif aux piles, les renseignements sur l'exécution de ces soubassements.

Ils ont été constitués par une ossature en fer sur laquelle venaient s'appliquer, à la partie inférieure, des pierres factices en béton comprimé présentant un appareil à gros bossages. La gorge formant la partie supérieure était construite en mortier de ciment appliqué sur place à l'aide de calibres suivant lesquels étaient traînées les moulures.

L'ossature (Pl. V, fig. 11 à 19) se composait de quatre grandes poutres à treillis de 2,80 *m* de hauteur, ayant la longueur de chacune des faces et qui venaient reposer à leurs extrémités sur les murs de pourtour. Celles des faces intérieures étaient interrompues pour le passage des portes. Sur ces poutres s'appliquait une série de fermettes triangulaires inclinées, de 5,40 *m* de hauteur, espacées en moyenne de 1,10 *m* et réunies par des entretoises horizontales en fer à simple T. Ces fermettes reposaient, en outre, pour les deux faces extérieures, sur les murs de pourtour eux-mêmes, et, pour les faces intérieures à la Tour, sur des fers à T s'appuyant sur ces murs.

Les pierres factices, d'environ 15 *m* d'épaisseur, sont posées sur les fers à simple T horizontaux formant entretoises, sur lesquels on les scellait au ciment. La hauteur des assises en dehors du boudin est de 3,00 *m*, celle de la gorge de 2,40 *m*.

La gorge supérieure était appliquée sur des cerces en fer, reliées à chaque fermette et venait dans le haut presque au contact des faces des arbalétriers.

En avant de chacune des faces intérieures se trouvent deux socles destinés à recevoir les arcatures des poutres décoratives. Enfin, l'angle le plus près du centre de la Tour est disposé suivant une courbe, le long de laquelle règne un banc.

Le poids des fers de cette ossature, fournie par MM. Pillet et Schmid, entrepreneurs de serrurerie, s'élève pour les quatre piles à 164.492 *k*, soit 41.123 *k* par pile.

Le montage a commencé le 23 septembre 1888 et a été terminé pour l'ensemble des quatre piles le 4 janvier 1889.

Les pierres factices ont été fournies par MM. E. Dubos et C^ie^.

La gorge supérieure en ciment, traînée sur place, a été exécutée par M. Combaz.

Le montage de ces revêtements a été terminé seulement en mai 1889.

Les piles ont donné lieu à certains travaux complémentaires :

Les massifs des ascenseurs ont dû être modifiés à la demande de la partie mécanique ; les maçonneries nouvelles se sont élevées ensemble à un cube de 194 m^3.

La pile 3, dont l'intérieur renferme la salle des machines, a été couverte par une toiture vitrée, établie par M. Bernard, entrepreneur de serrurerie, pesant 37.784 k.

On a établi au-dessus du réservoir destiné à la décharge des ascenseurs, un plancher en fer double T et tôle striée. Son poids est de 5.047 k.

Le sol des piles a été recouvert en asphalte sur une surface de 1.003 m^2.

Enfin on a disposé autour du soubassement, un rocaillage cachant les maçonneries et formant raccordement avec le sol.

§ 10. — Prix de revient des fondations.

Nous relatons d'abord ci-dessous les prix de façon ou d'achat de matériaux tels qu'ils résultent de nos marchés. Nous avons ensuite, avec leur aide, établi des prix composés que nous avons appliqués aux différents éléments du métré des piles ; mais nous nous sommes assurés en outre que l'ensemble des dépenses ainsi établies était d'accord, pour chaque catégorie d'entre elles, avec les chiffres portés à la comptabilité générale.

Ces chiffres ne comportent, bien entendu, ni frais généraux d'ensemble, ni bénéfices et, comme prix d'entreprise, ils devraient être très notablement majorés (15 °/₀ environ, sauf les fouilles générales, qui ont été exécutées par des sous-entrepreneurs).

Prix de façon.

	fr.
Fouilles générales. — Le m^3 transporté aux décharges publiques	2,90
» mis en dépôt dans le Champ-de-Mars	1,40
Fouilles partielles. — Le m^3 transporté sur les bords de la grande fouille	2,50
» jeté sur berge	1,00
Remblayage. — Le m^3	0,50
Fouilles à l'air libre dans les caissons. — Le m^3	3,50
» *à l'air comprimé* » »	7,50
Façon de béton à l'air libre ou dans les caissons y compris la pose. — Le m^3	3,25
Plus-value pour coulage dans l'air comprimé. — Le m^3	2,00
Remplissage des consoles des caissons. — Le m^3	5,75
Maçonnerie de moellon brut (façon du mortier comprise). — Le m^3	4,50
» *de pierre de taille* »	15,00
» *de briques* »	10,00
Rejointement des parements, le m^2	1,50

Prix des matériaux.

	fr.	fr.
Cailloux. — Livrés sur berge, y compris octroi, le m^3	2,75	
Transport à pied d'œuvre, le m^3	0,75	3,50
Sable. — Livré sur berge, y compris octroi, le m^3	3,60	
Transport	0,75	4,35
Moellon. — Livré sur berge, le m^3	9,10	
Transport	1,50	10,60
Ciment de Boulogne (Famchon) à pied d'œuvre, les 1000 kg		51,00
Chaux d'Echoisy, à pied d'œuvre, les 1000 kg		35,00
Briques, à pied d'œuvre, le mille		40,00
Pierre de taille, à pied d'œuvre, taille comprise, le m^3		105,00
Fers des caissons, à pied d'œuvre, les 100 kg		50,00
Boulons d'ancrage, à pied d'œuvre, les 100 kg		40,00

Prix composés (pour 1,00 m³)

		fr.	fr.
Béton au mortier de ciment.	Cailloux	0,75 à 3,50 = 2,62	
	Sable	0,50 à 4,35 = 2,17	
	Ciment	105 kg à 51 fr. 0/00 = 6,12	
	Façon	3,25	
	Faux frais, machines, etc.	0,50	14fr,06
Béton au mortier de chaux hydraulique	Cailloux	0,70 à 3,50 = 2,45	
	Sable	0,50 à 4,35 = 2,17	
	Chaux	125 kg à 35 0/00 = 4,37	
	Façon	3,25	
	Faux frais, machines, etc.	0,50	12fr,74
Maçonnerie de moellon brut au mortier de ciment	Moellon	1,10 à 10,60 = 11,66	
	Sable	0,35 à 4,35 = 1,52	
	Ciment	95 kg à 51 fr. 0/00 = 4,85	
	Façon	4,50	
	Faux frais, machines, etc.	0,50	23fr,03
Maçonnerie de moellon brut au mortier de chaux hydraulique	Moellon	1,10 à 10,60 = 11,66	
	Sable	0,40 à 4,35 = 1,74	
	Chaux	125 kg à 35 fr. 0/00 = 4,37	
	Façon	4,50	
	Faux frais, machines, etc.	0,50	22fr,77
Maçonnerie de briques au mortier de ciment	Briques	600 à 40 fr. le 0/00 = 24,00	
	Sable	0,40 à 4,35 = 1,74	
	Ciment	105 kg à 51 fr. 0/00 = 5,35	
	Façon	10,00	
	Faux frais, machines, etc.	1,50	42fr,60
Maçonnerie de pierre de taille au mortier de ciment	Pierre	le m^3 105 fr. = 105,00	
	Sable	10 0/0 à 4,35 = 0,44	
	Ciment	35 kg à 51 fr. = 1,79	
	Bardage dans le chantier	15,00	
	Façon	15,00	
	Faux frais	2,00	139fr,23

A ces prix, il convient d'ajouter, d'après les prix de revient donnés par la comptabilité :

Montage et rivure des caissons et des hausses, les 100 kg	3fr,46
Heures de machine pour déblais et bétonnage à l'air comprimé	4fr,10
Prix moyen de l'installation des sas et des cheminées, échafaudages, conduites, etc., par caisson	1220fr,00
Pose des boulons d'amarrage, pour un	65fr,14

D'après les prix ci-dessus, nous avons établi le prix de revient de chacune des piles, en étudiant

séparément celles construites par les procédés ordinaires (Piles N^os 2 et 3), et celles fondées à l'air comprimé (Piles N^os 4 et 1).

DÉSIGNATION.	PRIX UNITAIRES.	PILE N° 2. QUANTITÉS.	PILE N° 2. SOMMES.	PILE N° 2. TOTAUX.	PILE N° 3. QUANTITÉS.	PILE N° 3. SOMMES.	PILE N° 3. TOTAUX.
1° *Terrassements.*	fr.		fr.	fr.		fr.	fr.
Déblais transportés aux décharges publiques	2,90	5.351,00 m^3	15.517,90		»	»	
» mis en dépôt au Champ-de-Mars	1,40	»	»		5.498,64 m^3	7.698,09	
» montés sur les bords de la grande fouille	2,50	491,94	1.220,85		489,48	1.223,70	
» jetés sur berge	1,00	234,63	234,63		252,03	252,03	
Remblayage	0,50	4.169,92	2.084,96	19.007,34	1 444,00	722,00	9.895,82
2° *Fondations.*							
Béton de fondation au ciment	14,66	491,94	7.211,84		489,48	7.175,77	
» » à la chaux hydraulique	12,74	90,48	1.152,71	8.364,55	95,33	1.214,50	8.390,27
3° *Maçonneries supérieures.*							
Maçonnerie de moellons au ciment	23,03	948,15	21.835,90		813,60	18.737,21	
» » à la chaux hydraulique	22,77	316,16	7.198,96		631,06	14.369,23	
» de pierre de taille au ciment	139,23	39,38	5.482,87		39,38	5.482,87	
Rejointement des parements	1,50	205,20 m^2	307,80	34.825,53	935,23 m^2	1.402,85	39.992,16
4° *Ancrages.*							
Tirants en fer forgé, rondelles et sabots	0,40	6.792 *kg*	2.716,80		6.792 *kg*	2.716,80	
Pose des tirants	65,14	8	521,12		8	521,12	
Fers double T d'ancrage	0,20	912 *kg*	182,40		912 *kg*	182,40	
Tuyaux enveloppes des tirants	0,20	1.760	352,00	3.772,32	1.760	352,00	3.772,32
Prix de revient (sans frais généraux ni bénéfices				66.029,74			62.050,57

DÉSIGNATION.	PRIX UNITAIRES.	PILE N° 4. QUANTITÉS.	PILE N° 4. SOMMES.	PILE N° 4. TOTAUX.	PILE N° 1. QUANTITÉS.	PILE N° 1. SOMMES.	PILE N° 1. TOTAUX.
1° *Terrassements.*	fr.		fr.	fr.		fr.	fr
Déblais transportés aux décharges publiques	2,90	4.807,78 m^3	13.942,56		3.113,57 m^3	9.029,35	
» mis en dépôt au Champ-de-Mars	1,40	2.853,31	3.994,63		3.953,55	5.534,97	
Remblayage	0,50	4.217,88	2.108,94	20.046,13	4.066,42	2.033,21	16.597,53
2° *Caissons.*							
Fourniture des caissons et des hausses	0,50	123.076 *kg*	61.538,00		123.076 *kg*	61.538,00	
Réception, montage et rivure	3,46	123.076	4.258,43		123.076	4.258,43	
Déblais à l'air libre	3,50	580,12 m^3	2.030,42		694,92 m^3	2.432,32	
» » comprimé	7,50	1.206,69	9.050,18		1.446,89	10.851,68	
Installations spéciales (cheminées, échafaudages, etc.)	1.220,00	4 *c*	4.880,00		4 *c*	4.880,00	
Conduite et entretien des machines pour le déblai et le bétonnage à l'air comprimé	4,10	800 *h*	3.280,00		987 *h*	4.046,70	
Béton de fondation au ciment	14,66	1.988,67 m^3	29.153,90		2.141,81 m^3	31.398,93	
Plus-value pour coulage dans l'air comprimé	2,00	681,92	1.363,84	115.544,77	681,92	1.363,84	120.769,90
3° *Maçonneries supérieures.*							
Maçonnerie de moellon au ciment	23,03	1.078,89 m^3	24.846,83		1.078,89 m^3	24.846,83	
» de briques »	42,60	23,51	1.001,53		23,51	1.001,53	
» de moellon à la chaux hydraulique	22,77	355,70	8.099,20		355,70	8.099,29	
» de pierre de taille au ciment	139,23	39,38	5.482,87		39,38	5.482,87	
Rejointement des parements { moellon	1,50	121,54 m^2	182,31		121,54 m^2	182,31	
Rejointement des parements { brique	1,50	86,31	129,47		86,31	129,47	
Ossature en fer double T	0,45	4.238 *kg*	1.907,10	41.649,40	7.530 *kg*	3.388,50	43.130,80
4° *Ancrages.*							
Tirants en fer forgé, rondelles et sabots	0,40	6.792 *kg*	2.716,80		6.792 *kg*	2.716,80	
Pose des tirants	65,14	8	521,12		8	521,12	
Fers double T d'ancrage	0,20	912	182,40		912	182,40	
Tuyaux enveloppes des tirants	0,20	1.760	352,00	3.772,32	1.760	352,00	3 772,32
Prix de revient (sans frais généraux ni bénéfices)				181.022,62			184.270,55

BIBLIOTHÈQUE NATIONALE IMPRIMÉS R.F.

Ces résultats peuvent se grouper de la manière suivante :

DÉSIGNATION.	PILE N° 2.	PILE N° 3.	PILE N° 4.	PILE N° 1.	TOTAUX.
	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.
Terrassements...	19.007,34	9.895,82	20.040,13	16.597,53	65.606,82
Fondations (à l'air libre ou caissons).....	8.304,55	8.300,27	115.554,77	120.769,90	253.070,49
Maçonneries supérieures.....	34.825,53	39.992,16	41.649,40	43.130,80	159.597,89
Ancrages.....	3.772,32	3.772,32	3.772,32	3.772,32	15.089,28.
Totaux.....	66.029,74	62.050,57	181.022,62	184.270,55	493.373,48

Les chiffres inscrits ci-dessus pour les Piles N^{os} 4 et 1 permettent de calculer le prix moyen du mètre cube de fondation par le procédé de l'air comprimé.

DÉSIGNATION.	PRIX.	CUBE.	PRIX UNITAIRE.
	fr.	m^3	fr.
Pile n° 4.....	115.554,77	1.988,67	58,10
Pile n° 1.....	120.769,90	2.141,81	56,38
Totaux..... ...	236.324,67	4.130,48	Prix moyen 57,21

Quant aux soubassements, les pierres factices traitées à MM. Dubos et C^{ie} ont fait l'objet d'un forfait s'élevant à 36.000 *fr* pour les quatre piles, dont 9.000 *fr* pour la fourniture et 7.000 *fr* pour la pose. Le prix de ce revêtement, compté au mètre carré de projection sur le plan des faces, était ainsi de 27 *fr*.

La gorge supérieure en ciment a été faite par M. Combaz au prix de 13,50 *fr* le mètre superficiel.

Le prix de l'ossature était de 39 *fr* les 100 *kg* pour les poutres et fermettes, et de 60 *fr* pour les cerces de la gorge.

Le prix de ces soubassements pour l'ensemble des quatre piles s'établit comme suit :

DÉSIGNATION	QUANTITÉS.	PRIX UNITAIRES.	PRIX	
			PARTIELS.	TOTAUX.
1° *Ossature métallique.*		fr.	fr.	fr.
Poutres et fermettes.....	153.383 *kg*	39,00	59.819,37	
Cerces de la gorge supérieure.....	12.288	60,00	7.372,80	
Montage de l'ossature.....	165.671	5,27	8.729,30	75.921,47
2° *Maçonnerie.*				
Revêtement en béton comprimé (forfait).....	»	»	36.000,00	
Tracé des joints.....	768,36 m^2	0,65	576,27	
Gorge supérieure en ciment.....	1.136,36	13,50	15.340,08	51.916,35
3° *Travaux supplémentaires.*				
Retombées des arcs et bancs.....	154,348 m^3	21,00	4.081,30	
Asphaltage des piles.....	1.003 m^2	4,25	4.265,90	
Rocaillage (Mémoire payé au service des Travaux).....	»	»	10.869,12	19.216,32
Total.....				147.054,14
Ce qui donne pour chacune des piles.....				36.763^{fr},54

Les travaux accessoires qui ont dû être exécutés dans chaque pile pour l'installation des ascenseurs,

et dans la pile N° 3, pour l'installation de la machinerie, sont résumés dans le tableau ci-dessous :

DÉSIGNATION DES TRAVAUX.	PRIX UNITAIRES.	PILE N° 1.		PILE N° 2.		PILE N° 3.		PILE N° 4.		TOTAUX.	
		QUANTITÉS.	SOMMES.	QUANTITÉS.	SOMMES.	QUANTITÉS.	SOMMES.	QUANTITÉS.	SOMMES.	QUANTITÉS.	SOMMES.
	fr.		fr.		fr.		fr.		fr.		fr.
Terrassements	2,50	445,991 m^3	1.114,97	282,77 m^3	706,90	839,32 m^3	2.098,29	238,26 m^3	583,15	1805,341m^3	4.503,31
Béton de chaux hydraulique	12,74	123,672	1.575,58	61,567	784,36	100,00	1.274,00	61,567	784,36	346,806	4.418,30
Maçonnerie de chaux hydraulique.	22,77	20,414	464,83	80,00	1.821,60	130,00	2.960,10	50,00	1.138,50	280,414	6.385,03
» de briques	42,60	30,998	1.320,51	»	»	»	»	20,00	852,00	50,998	2.172,51
Rejointoiement	1,50	140,00 m^2	210,00	125,00 m^2	187,50	»	»	125,00 m^2	187,50	390,00 m^2	585,00
Totaux			4.685,89		3.500,36		6.332,39		3.545,51		18.064,15
En ajoutant au prix total, une somme provenant de travaux communs aux quatre piles et qui s'élève à											7.588,75
Le prix de revient de tous les travaux d'aménagement est de											25.652,90

En résumé la dépense totale relative à l'infrastructure de la Tour s'établit comme suit :

Fondations et maçonneries	403.373fr,48
Soubassements	147.054fr,14
Maçonneries supplémentaires (machinerie et ascenseurs)	25.652fr,90
Dépense totale	666.080fr,52

CHAPITRE II

PARTIE MÉTALLIQUE

---

§ 1. — Travail à l'atelier.

Pendant que les travaux de fondation s'exécutaient dans le Champ-de-Mars, on mettait en train le travail à l'atelier dans les usines de Levallois-Perret, tant comme études que comme préparation des fers.

Ces études, indépendamment des calculs donnés précédemment, d'après lesquels chacune des sections était rigoureusement déterminée, ont été très laborieuses et cela pour deux motifs. Le premier tenait à ce que les épures présentaient de sérieuses difficultés : les pièces à assembler étaient toujours situées dans des plans obliques à inclinaisons variables et en outre elles étaient à peu près toutes dissemblables. Le second motif était la conséquence de notre mode de travail habituel, à l'application duquel nous avons tenu plus strictement que jamais en raison des difficultés spéciales de la construction. Dans ce mode, on écarte l'établissement des épures en grandeur servant au tracé de calibres que l'on reporte ensuite avec plus ou moins de précision sur les différentes pièces à assembler. On établissait au contraire le dessin de chaque pièce isolée, en calculant avec une rigueur qui exigeait l'emploi constant des logarithmes, la position sur celle-ci des différents trous de rivets par lesquels est obtenue sa liaison avec les pièces voisines. Tous les écartements des trous étaient calculés mathématiquement à un dixième de millimètre près. Chaque pièce exigeait donc une étude particulière et un dessin spécial que l'on établissait le plus habituellement en demi-grandeur pour les petites pièces et au cinquième pour celles de plus grandes dimensions.

Cette méthode est complètement différente de celle employée dans les grands travaux anglais, même dans le beau pont du Forth. Pour ceux-ci, on n'établit guère que des dessins d'ensemble; les épures elles-mêmes, dessinées en grandeur, sont très sommaires et on ménage un grand nombre de trous à percer sur place à la demande du montage. Par notre méthode, au contraire, tous les trous étaient percés à l'avance avec une grande précision, le montage était réglé par les trous eux-mêmes et c'était en *brochant*, c'est-à-dire en enfonçant à force dans les trous un grand nombre de broches coniques en acier, qu'on amenait la pièce à assembler dans sa position rigoureuse. Quand la coïncidence était complète, aucune vérification du montage n'était à faire; on était sûr que tout marchait bien et que le montage, tel qu'il était prévu, se réalisait. Il y avait ainsi une préparation absolue et complète des différentes pièces hors du chantier, et sur le chantier, simplement la mise en place et l'assujettissement scrupuleux des pièces les unes avec les autres.

Voici ce que dit à ce sujet M. Alfred Picard dans son Rapport Général :

« Malgré l'importance du travail de montage, on n'a pas vu sur le chantier ces équipes nombreuses que l'on pouvait s'attendre à y trouver; le nombre des ouvriers n'a point dépassé 250 : c'est qu'en effet on avait réduit au minimum non seulement l'usage de la force humaine, mais aussi les opérations à pied d'œuvre. Les pièces arrivaient des ateliers de Levallois-Perret préparées jusqu'à l'extrême limite de ce qu'il était possible de ne pas faire au Champ-de-Mars; il n'y avait plus aucun trou à percer, aucun ajustage à opérer; la plupart des rivets étaient posés; les éléments de la construction s'adaptaient les uns aux autres, sans aucune retouche.

« A ce dernier point de vue, le montage de la Tour mettait bien en lumière la différence profonde qui existe entre la méthode française et la méthode anglaise. Dans la Grande-Bretagne, le travail est généralement poussé beaucoup moins loin à l'atelier et, par suite, bien plus développé sur le lieu d'emploi; les pièces ne sont pas préparées avec un soin aussi minutieux à l'usine; elles arrivent plutôt dégrossies que finies; après les avoir présentées, le monteur les retouche, s'il y a lieu, et en achève la préparation.

« Quelle est de ces deux méthodes la meilleure? Sans me prononcer, je puis dire tout au moins que celle des constructeurs français a des mérites incontestables; elle ne laisse rien à l'imprévu, elle assure à toutes les parties de la construction une précision rigoureuse, elle restreint et simplifie les ateliers de montage. »

Pour donner une idée de l'importance du travail des études, il suffit de dire que le bureau d'études proprement dit, dirigé par M. Maurice Kœchlin, a fait pour l'ossature de la Tour seule, non compris les ascenseurs et les travaux accessoires tels que soubassements, escaliers, réservoirs, restaurants, etc., plus de 1.700 dessins d'ensemble; que le bureau de détail dirigé par M. Pluot a établi 3.629 dessins pour l'exécution. La surface de ces 5.300 dessins dépasse 4.000 m^2. Quant au nombre des pièces différentes qui y sont détaillées, il s'élève à 18.038. Cette œuvre considérable a exigé le travail assidu de trente dessinateurs pendant dix-huit mois.

Les fers ont été commandés aux usines de MM. Dupont et Fould, à Pompey (Meurthe-et-Moselle); les essais ont accusé les résistances et les allongements moyens suivants pour des éprouvettes de 200 *mm* de longueur.

DÉSIGNATION.	CHARGE DE RUPTURE PAR mm^2	ALLONGEMENTS MESURÉS SUR 200 *mm*
	kg	
Cornière de 100×100×12	35,0	8,00 °/₀
Plat de 100×20	35,3	15,00 °/₀
Plat de 390×15	36,9	12,00 °/₀
Tôle (sens du laminage)	32,3	7,25 °/₀
Même tôle (en travers)	27,0	3,5 °/₀

Leur fabrication n'a jamais rien laissé à désirer et tous les efforts ont été faits par cette usine pour ne nous livrer jamais que des fers d'excellente qualité.

Le travail marcha dans les ateliers avec la plus grande régularité à raison de trois à quatre cents tonnes par mois, de juin 1887 à mars 1889. Le total des fers livrés par l'atelier a été de 6.360 tonnes. Ce poids est notablement inférieur au poids réel de la Tour, parce qu'il ne comprend pas le poids des rivets posés sur place ni celui de pièces accessoires livrées directement au chantier.

Tous les assemblages avaient été étudiés avec le plus grand soin au point de vue de la facilité du montage et du nombre minimum de rivets à poser sur place. En outre, afin d'éliminer toute chance d'erreur ou même de simple retouche sur place, ce que l'on voulait à tout prix éviter, toutes les pièces avant leur sortie de l'atelier étaient présentées *à plat* par une série de montages successifs, avec celles auxquelles elles devaient s'assembler.

Ainsi il n'a été fait aucun de ces montages *en grand* des pièces suivant leur position respective réelle, que l'on fait souvent pour s'assurer une complète sécurité. En raison des dimensions considérables des pièces de l'ouvrage, il eût été une cause de gêne, de retard et de dépenses inutiles. Il a été remplacé avantageusement par une série de petits montages *à plat* dans lesquels toutes les pièces passèrent deux à deux au contact, sans qu'aucune échappât à la vérification nécessaire.

Grâce à toutes les précautions prises, aucune erreur ne s'est produite, et ce travail, qui est d'une complication telle qu'elle nous a étonnés nous-mêmes au fur et à mesure que l'exécution s'avançait, s'est fait de telle façon que, sans exagération aucune, on peut déclarer que cette exécution a été irréprochable. Ce résultat était dû non seulement aux soins qu'y ont apportés M. Létourneau, chef d'atelier, ainsi que MM. Pentecôte et Gagnot, contremaîtres; mais aussi, pour tout le personnel, à un ensemble de conditions résultant d'une longue expérience des grands travaux et d'une émulation bien difficile à rencontrer et à maintenir. Chacun, en vue du but à atteindre, se faisait un point d'honneur d'y apporter le concours le plus dévoué.

§ 2. — Appuis et vérins hydrauliques.

Nous avons vu que les appuis sur lesquels doivent reposer les arbalétriers se composaient d'un sabot en fonte reposant sur la pierre de taille et d'un contre-sabot en acier moulé pénétrant dans le sabot et dans le

vide intérieur de l'arbalétrier (voir fig. 114). Dans l'espace ménagé entre le sabot et le contre-sabot, on pouvait introduire un vérin hydraulique de 800.000 *kg* de force.

Ce vérin est représenté dans la planche VI (fig. 17 à 19). Son piston cylindrique est en fonte pleine. Son diamètre est de 0,43 *m*, sa hauteur, de 0,34 *m*. Il porte à sa partie inférieure un cuir embouti maintenu par une couronne en bronze boulonnée. Le corps du vérin lui-même est en fer forgé d'une épaisseur de 95 *mm* ; son diamètre extérieur est de 0,62 *m* et sa hauteur de 0,41 *m*.

La pompe qui actionne les vérins était portée sur un chariot pour la rendre transportable ; elle avait une course de 6 *cm* ; le diamètre du tuyau de refoulement était de 6 *mm* : on l'actionnait à bras à l'aide d'un grand levier métallique.

Fig. 114.

Avant de sortir des ateliers des constructeurs, tous les appareils avaient été essayés à une pression de 600 atmosphères, qui correspondait à un effort de 900 tonnes sur le piston.

Ce vérin était introduit entre les deux sabots par une ouverture ménagée sur l'une des parois ; le refoulement de l'eau à sa partie inférieure permettait de faire monter de la hauteur convenable le contre-sabot portant l'arbalétrier.

Les vérins, qui étaient au nombre de deux, étaient capables de soulever simultanément deux arbalétriers, même en supposant la Tour complètement achevée. Nous avons vu, en effet, que la réaction d'un arbalétrier sous l'effet du poids propre ne dépasse pas 723 tonnes. On pouvait donc produire des efforts capables de régler les niveaux relatifs des pieds de la Tour, même après son complet montage, comme on règle un niveau ordinaire à l'aide de vis.

Ces appuis, dont la plupart des faces étaient soigneusement dressées, ont été exécutés aux aciéries d'Imphy.

Les poids et prix ont été les suivants :

Sabot inférieur en fonte	5.782 *kg* à 17,50 =	1.011,85
Contre-sabot en acier moulé	2.551 *kg* à 40,20 =	1.178,56
Total	8.333 *kg* =	2.190,41
Leur nombre étant de 16, leur prix total est de		35.046,56
Les deux vérins et la pompe foulante avec ses raccords et ses tuyaux, construits par MM. Vollot, Badois et Cie ont coûté		5.250fr,00

La pose de ces appuis, faite avec la plus grande précision possible, a été terminée dans le courant de juin, et le 1er juillet on put procéder au montage de la partie métallique proprement dite.

§ 3. — Montage des deux premiers étages.

C'est le 1er juillet 1887 que commença ce montage, qui s'effectua, au fur et à mesure des livraisons faites par l'usine, par les moyens les plus simples.

On fit usage de grandes bigues de 22 *m* de hauteur, qui d'abord reposaient sur le sol. Ce mode d'opérer, qui ne pouvait s'employer avec quelque avantage que pour des hauteurs restreintes, était d'autant plus applicable dans la circonstance qu'aucune des pièces à soulever ne dépassait le poids de 3.000 *kg*.

Nous nous étions fixé ce poids relativement faible comme une limite qui ne devait être dépassée que tout à fait exceptionnellement. Elle était en effet de nature à nous donner un montage économique et rapide ; avec des pièces très lourdes, on est obligé de se servir d'engins de levage très puissants, difficiles à installer et à déplacer ; toutes les installations du chantier s'en ressentent, elles deviennent plus importantes et plus coûteuses. Les chances d'accident augmentent et, s'il s'en produit, les conséquences en sont beaucoup plus graves. Il est vrai que le nombre des rivets à poser sur place augmente en raison même de la diminution de longueur des tronçons et du plus grand nombre de joints ; mais cet inconvénient est très largement compensé par la facilité que procure la manœuvre de pièces relativement légères.

Les pièces arrivaient de l'usine sur des camions qui venaient se présenter sous la grue roulante placée à

l'entrée du chantier. De là, elles étaient chargées sur des wagonnets qui, par quatre voies divergentes, les conduisaient à l'emplacement de chacune des piles. Les bigues les montaient dans leurs places respectives. Les premiers tronçons coiffant les sabots étaient étayés par des pièces de bois jusqu'à ce que les entretoisements vinssent les lier entre eux et s'opposer à leur renversement. On superposa ainsi trois tronçons successifs, dont la hauteur dépassait le milieu du premier panneau.

Avant de passer aux tronçons suivants, on mit en place toutes les pièces de liaison telles que grandes poutres horizontales des faces, treillis et pièces diagonales. Puis la position de toutes les parties de cette base était vérifiée par des mensurations rigoureuses et plusieurs fois contrôlées. Elles se faisaient à l'aide de règles construites d'après le mètre étalon qui avait servi au traçage des pièces à l'atelier. Quand on se fut assuré des positions respectives et des niveaux de toutes les pièces de cette base, on put marcher avec assurance. Ce premier montage est représenté dans la photographie N° 3, prise le 18 juillet à la Pile N° 4.

Une fois les premiers tronçons placés, il était préférable d'employer des moyens moins primitifs, et c'est ce que l'on fit pour la pile 3 en installant, le 2 septembre, la première grue de montage qui nous fut livrée et dont nous parlerons en détail plus loin.

Mais comme les autres grues ne nous furent livrées que plus tardivement, le montage des autres piles se fit en grande partie avec les bigues employées pour la base, en les relevant progressivement sur des planchers portés par la construction elle-même.

Par l'un ou l'autre de ces moyens, on mit en place les tronçons successifs jusqu'à la partie supérieure du deuxième panneau; ces tronçons étaient reliés au fur et à mesure par les pièces qui les entretoisaient, et on procédait de suite à leur rivure.

Mais comme ces tronçons étaient inclinés de 54° environ suivant le plan diagonal, il devait arriver bientôt un moment où le centre de gravité du montant tomberait en dehors de la base formée par les appuis et ferait travailler les boulons d'anerage.

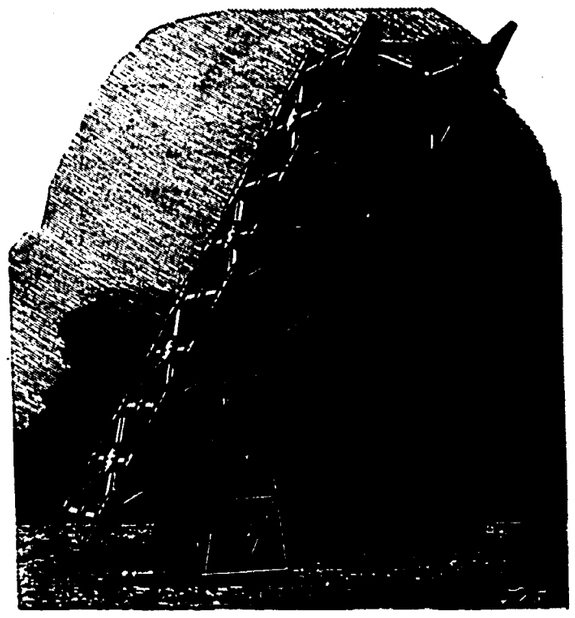


Fig. 115.

Le calcul nous avait montré que l'on ne pouvait dépasser la hauteur de 28 *m* correspondant à l'entretoise limitant le panneau 2; cette hauteur fut atteinte le 10 Octobre.

Le poids des pièces ainsi montées s'élevait à 900.000 *kg* environ; le nombre des rivets posés à 98.000.

Pour s'opposer au renversement et pouvoir continuer au delà le montage jusqu'au niveau de la première plate-forme, il était devenu nécessaire de construire des échafaudages sur lesquels devaient venir s'appuyer les trois arêtes des montants les plus rapprochées de l'axe de la Tour.

§ 4. — Pylônes de butée.

Ces échafaudages étaient constitués par quatre pylônes pyramidaux semblables, de telle sorte que la réaction due à l'inclinaison et qui devait s'élever pour chacun des montants à 155 tonnes environ après le montage des quatre premiers panneaux, fût supportée par ces quatre pylônes, dont deux accolés étaient placés sous l'arête médiane, et deux séparés placés sous les deux autres arêtes, ainsi que le montre le dessin de la maquette que nous avions établie (fig. 115).

Ces grandes réactions, dans un cas extrême, pouvaient se reporter sur deux des pylônes seulement, ce qui donnait pour chacun d'eux une charge de 80 tonnes. Pour assurer une sécurité parfaite, ils ont même été calculés pour une charge très notablement supérieure, soit 120 tonnes environ.

Leur fondation devait aussi être très solidement établie; elle nécessitait l'emploi d'un nombre convenable de pieux battus au refus. Ce nombre est de 8 par pylône, ce qui donne une charge par pieu d'environ 15 tonnes, qui se réduit dans le cas maximum de la pratique à 10 tonnes; l'ensemble des échafaudages d'un montant comportait ainsi l'emploi de 32 pieux.

Ces pieux, de 0,35 *m* de diamètre, avaient une fiche de 6 *m* de longueur pour les piles 2 et 3 et de 9 *m* pour les piles 1 et 4. Ils ont été battus par une sonnette à vapeur au refus de 0,10 *m* pour les dix

derniers coups d'un mouton de 1.000 *kg* tombant de 1,80 *m*. Quelques-uns d'entre eux pour les piles 1 et 4, placés au-dessus de la déviation de l'égout, ont été remplacés par des pièces de bois descendant au niveau des maçonneries et établies au fond de fouilles spéciales.

L'échafaudage qui les surmontait (voir Pl. XXV, fig. 1, 2, 3, 13 et 14 et la fig. ci-contre N° 116) était en forme de pyramide quadrangulaire avec deux faces verticales. Sa base était de 8,50 *m* de côté et sa hauteur de 27,40 *m*. Les pièces principales étaient formées par des poutres équarries de 0,27 *m* de côté; elles étaient entretoisées par 7 rangées de moises de 0,25 × 0,12 *m* et contreventées sur les quatre faces de la pyramide par des bois de 0,22 × 0,22 *m* formant croix de Saint-André.

Le cube des pieux employés pour les pylônes des quatre piles a été de 85 m^3. Celui de chaque pylône était de 23,12 m^3, soit pour une pile 23,12 × 8 = 92,504 m^3, et pour l'ensemble de la Tour 374 m^3 y compris le plancher reliant les pylônes.

Le prix de revient de cette charpente a été le suivant :

1° *Pieux.*

Bois	85 m^3 à 45fr,00 = 3.825fr,00		
Battage	Le pieu à 35fr,00		
Sabot	5 *kg* à 0,40 = 2fr,00		
	113 pieux à 37fr,00	= 4.181fr,00	8.006fr,00

2° *Charpentes.*

Bois	Le m^3 63fr,00	
Déchet pour coupes et joints 5 %	3fr,15	
Main-d'œuvre de taille, levage, démolition et divers	46fr,50	
	112fr,65	
Faux frais, 5 %	5fr,65	
Boulons	20 *kg* à 0,35 = 7fr,00	
	125fr,30	
	374 m^3 à 125fr,30 =	46.862fr,20
Total		54.868fr,20

Soit environ 13.700 francs par pilier.

Fig. 116.

§ 5. — Boîtes à sable.

La construction en fer ne reposait pas directement sur les têtes des pylônes; on se servait comme intermédiaires de boîtes à sable représentées dans les figures 11 et 12 de la Planche XXV.

On avait tout d'abord rivé sur les tronçons de robustes sabots provisoires en fer, représentés en plan dans la figure 5 de la planche XXV pour l'arbalétrier médian, et dans la figure 9 pour les arbalétriers latéraux. Les premiers présentent une table inférieure horizontale de 14 *mm* d'épaisseur, épousant la forme de l'arbalétrier et ayant une longueur de 1,65 *m* sur 1,03 *m*. Elle est maintenue par six fortes consoles en tôles et cornières de 1,33 *m* de hauteur, rivées sur les faces de l'arbalétrier. Les autres ont une table de 0,877 *m* sur 0,908 *m* maintenue par 3 consoles semblables aux premières. Les consoles sont réunies entre elles par des entretoisements et reliées en outre par des cornières provisoires à la grande entretoise voisine.

Les boîtes à sable sont des cylindres en tôle de 0,50 *m* de hauteur et de 0,40 *m* de diamètre qu'on remplit en partie de sable très sec et dans lesquels on introduit un tampon de chêne fortement fretté de 0,50 *m* de hauteur, formant piston. Le cylindre porte à sa base un trou que l'on ferme avec une fiche en bois. Si l'on retire cette fiche et que l'on gratte par l'ouverture le sable contenu dans le cylindre, ce sable s'écoule, mais l'écoulement s'arrête dès qu'on ne le provoque plus. Il s'ensuit qu'on peut régler la descente du piston avec une extrême lenteur et l'arrêter exactement comme on le désire.

Par ce moyen, on se réservait donc de pouvoir abaisser la construction métallique portée par les échafaudages de butée, ce qui devait servir plus tard à l'amener exactement à sa place définitive. On pouvait également produire des relèvements à l'aide de vérins hydrauliques ordinaires placés à côté des boîtes à sable et prenant leur point d'appui sur le sommet du pylône. Comme, en outre, la manœuvre des vérins hydrauliques placés sous les appuis permettait de soulever ou d'abaisser les arbalétriers des montants, on disposait, par la combinaison de ces divers modes d'action, de moyens de réglage très sûrs qui mettaient absolument dans la main du contremaître de montage le déplacement de ces grosses masses à l'aide de

trois ou quatre hommes seulement, sans que le travail fût interrompu et sans même que l'on s'en aperçût.

« C'était merveille, dit M. Alfred Picard, de régler la position de masses si considérables, comme un « géomètre règle son niveau à bulle d'air à l'aide de vis. »

§ 6. — Grue de montage.

Pour le montage des pièces à partir de la base pour la pile 3 et à partir du deuxième panneau pour les autres, on se servit de grues spéciales, qui nécessitent que nous nous y arrêtions assez longuement, parce qu'elles furent utilisées jusqu'à l'achèvement des travaux et qu'elles nous rendirent les plus grands services. Elles ont été étudiées avec le plus grand soin et réalisées avec un rare succès par M. Guyenet, ingénieur-constructeur, d'après le programme que nous lui avions tracé.

Nous avons vu qu'à l'intérieur de chaque montant et au-dessus de l'arbalétrier le plus rapproché du centre de la Tour, se trouvent les chemins des ascenseurs. Ce sont deux grandes poutres inclinées suivant la même direction que l'arbalétrier, ayant une hauteur de 1,30 *m*, et qui sont comme les rails gigantesques de la voie suivie par les cabines des ascenseurs.

C'était cette même voie qui devait être utilisée au fur et à mesure de sa mise en place, pour servir de chemin à la grue.

Comme celle-ci devait pouvoir amener à leur position définitive toutes les pièces composant le montant et en particulier les poutres des ascenseurs, elle montait elle-même la voie suivant laquelle on devait la hisser.

Chaque pilier devait être muni d'une grue semblable, d'une force de 3.000 *kg* et d'une portée pouvant varier de 5,50 *m* à 12 *m*, afin de desservir aisément tous les points du plan de pose compris entre les quatre arbalétriers d'un montant.

Par suite de ces conditions, ces grues devaient être rotatives et à portée variable : elles devaient, de plus, à cause des changements d'inclinaison du chemin à parcourir, être munies d'un mécanisme permettant de rétablir facilement la verticalité de leur pivot, et enfin porter l'engin servant à les hisser sur les poutres des ascenseurs.

Le principe de la grue, telle qu'elle a été réalisée par M. Guyenet (voir fig. 117), consiste à disposer sur les chemins d'ascenseurs un châssis en fer, C, qui peut, soit glisser sur ces chemins, soit s'y boulonner, et auquel est suspendue par une articulation à sa partie supérieure, une hotte en fer, D, ayant la forme de tronc de pyramide renversé qu'affecte la hotte ordinaire destinée à porter les fardeaux ; dans cette hotte est installée la grue. A 2,50 *m* plus haut, mesurés suivant l'inclinaison, se trouve une traverse en fer, G, qui peut également, soit glisser sur le chemin, soit s'y boulonner. La traverse et le châssis sont reliés par une forte vis, H. En déboulonnant le châssis et en tournant la vis, on peut amener celui-ci au contact de la traverse, il est boulonné dans cette position ; on peut alors, après avoir déboulonné la traverse, tourner la vis en sens contraire et, en prenant cette fois son appui sur le châssis, la porter à 2,50 *m* plus haut. L'appareil entier aura ainsi monté de 2,50 *m*.

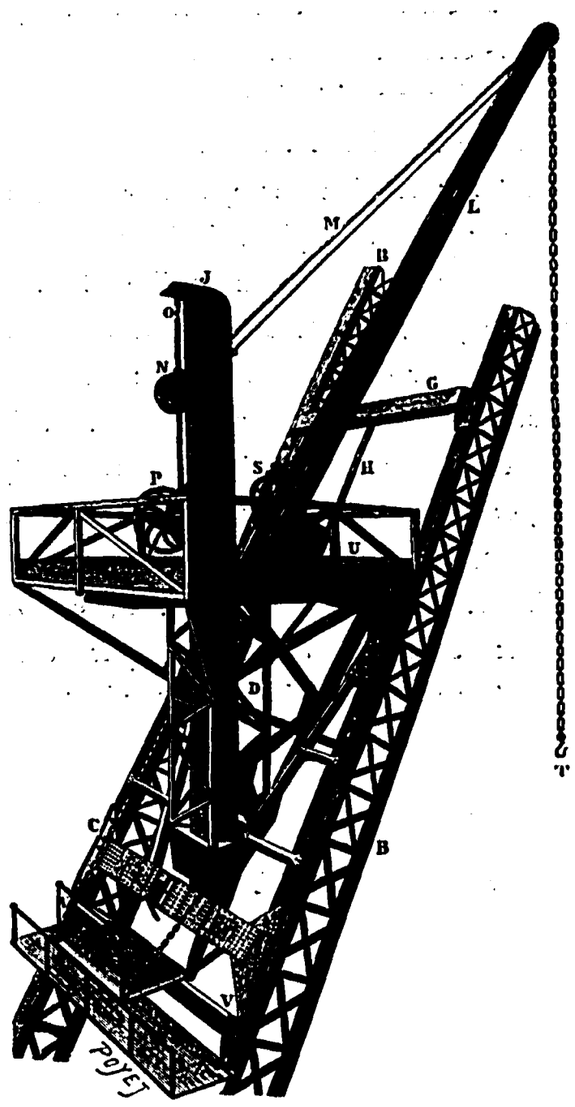


Fig. 117.

Pour opérer avec toute sécurité et pour que le châssis portant la grue ne soit pas simplement suspendu à une vis en mouvement, on a disposé, en bas, une traverse V analogue à celle du haut, de 0,50 *m* de hauteur, portant des vérins à petite course, suivant le châssis dans sa montée et prête à le recevoir en cas de rupture de la vis.

En manœuvrant alternativement dans un sens ou dans l'autre la grande vis et simultanément les petites

vis, pour lesquelles la manœuvre de la traverse est plus fréquente, on arrive, par une série de cheminements progressifs, à monter l'ensemble de l'appareil à toutes les hauteurs.

Le simple exposé de ce principe facilitera l'intelligence de la description qui va suivre, de cet appareil représenté en perspective cavalière dans la figure ci-dessus et dans tous les détails dans la planche XXIV, fig. 1, 2, 3, 4 et 13.

Nous l'empruntons, ainsi que quelques autres détails qui vont suivre, à une communication faite en 1890 à la Société d'encouragement pour l'Industrie nationale, par M. E. Nouguier, notre ingénieur, que nous avions chargé de la direction des travaux de montage.

L'appareil comporte :

1° Un châssis mobile, CC, qui est boulonné sur les poutres d'ascenseur quand la grue fonctionne et qui peut glisser sur ces mêmes poutres, quand il devient nécessaire d'élever le niveau de la grue.

2° Un ensemble de pièces métalliques formant une sorte de hotte, D, portant, à sa partie supérieure, la plate-forme U de la grue et, à sa partie inférieure, la crapaudine du pivot de la grue. Cette hotte est suspendue au châssis CC par deux articulations situées dans le plan de la plate-forme et est reliée à la traverse inférieure du châssis par une vis. On comprend aisément, à l'inspection de la figure, qu'un homme placé sur le plancher spécial F peut, en manœuvrant cette vis, faire varier la position de la hotte et, par suite, ramener le pivot de la grue dans la verticale, quelle que soit l'inclinaison de la voie de l'ascenseur.

3° La grue proprement dite. Celle-ci se compose : d'un pivot, JJ, qui repose, à sa base, sur la crapaudine portée par la hotte et qui est maintenu en son milieu par un cercle de roulement placé dans l'épaisseur du plancher de la plate-forme : d'une flèche L portant le treuil de levage S, flèche qui est reliée au pivot J, à son extrémité inférieure, par une articulation, et, à son extrémité supérieure, par deux tirants, M, réunis sur un essieu monté, N, qui peut se déplacer le long du pivot. Cet essieu porte un écrou actionné par une vis, O. Un volant, P, sur l'axe duquel est un pignon engrenant avec une roue dentée conique fixée à la vis, permet, en faisant monter ou descendre l'essieu N, d'augmenter ou de diminuer la volée de la grue. En agissant sur le même volant P, on peut également communiquer un mouvement de rotation à la grue. A cet effet, on commence, par débrayer le mécanisme de relevage et alors un second pignon monté sur l'axe du volant vient engrener avec une roue conique fixée sur un arbre vertical, dont l'extrémité inférieure porte un pignon commandant une crémaillère circulaire faisant partie du cercle de roulement. Un rochet et un cliquet d'arrêt empêchent la grue de tourner lorsqu'on lui a donné l'orientation voulue.

Le déplacement de la grue sur le chemin des ascenseurs s'opère au moyen de la grosse vis de halage H et des deux vérins de sécurité.

La vis H passe dans un écrou relié par deux tirants à la traverse supérieure du châssis C; elle porte à sa tête une traverse ou sommier mobile, G, pouvant glisser sur les poutres d'ascenseur B, ou se boulonner sur elles. Un cliquet, muni d'un levier qu'on manœuvre de la plate-forme U de la grue, sert à actionner cette vis.

Les vérins de sécurité V agissent au-dessous du châssis mobile, suivant l'axe des poutres d'ascenseur; ce sont des vérins à vis reliés par une entretoise X et qui portent à leur tête une butée à semelle qui s'applique contre la traverse inférieure du châssis mobile CC. L'entretoise et les butées peuvent tour à tour, soit glisser sur les poutres d'ascenseur, soit être fixées sur elles au moyen de boulons.

Quand on voulait élever la grue, on commençait par l'orienter de manière que sa volée vînt se placer dans l'axe du chemin des ascenseurs en restant tournée vers l'intérieur de la Tour. On agissait alors sur la grosse vis H de manière à amener la traverse de tête G à fond de course à 2,50 *m* plus haut que dans sa précédente position. On la boulonnait sur les poutres d'ascenseur BB et on déboulonnait ensuite le châssis mobile CC, qui se trouvait alors suspendu à la vis H et supporté, à sa base, par les vérins de sécurité V. On manœuvrait à nouveau la vis de halage H, et le châssis CC montait en glissant sur les poutres BB enlevant avec lui la grue et sa hotte. Des hommes installés sur le plancher Z suivaient avec les vérins de sécurité le mouvement ascensionnel en maintenant toujours la tête de ces vérins en contact avec la base du châssis, de sorte que ce dernier, en cas de rupture de la vis H, n'aurait pas pu tomber, retenu qu'il était par les deux vérins V.

La course de ceux-ci n'était que de 0,50 *m*, ce qui obligeait à faire un certain nombre de reprises pour accomplir l'entier déplacement de la grue. Quand ces vérins étaient arrivés à fond de course, on boulonnait leurs butées sur les poutres BB, on déboulonnait leur entretoise X qui, pendant le hissage, était restée fixée sur ces mêmes poutres BB. En manœuvrant les vérins, en sens inverse, ils faisaient monter l'entretoise de toute la hauteur de leur course. On la reboulonnait sur les poutres BB, on déboulonnait les butées et on recommençait une nouvelle marche en avant, en actionnant derechef et simultanément la grosse vis H et les deux vérins de sécurité V.

L'opération du relevage de la grue durait environ 18 heures et employait 10 hommes, outre le chef d'équipe.

Le montage de toutes les pièces constitutives des montants de la Tour a été fait avec les grues dont nous venons de donner la description. On commençait par monter les arbalétriers et, après eux, les barres de treillis et les entretoises qui, en réunissant les portions des piliers déjà montées, les obligeaient à venir occuper leur position exacte. Derrière les équipes de monteurs venaient les équipes de riveurs, qui remplaçaient les boulons provisoires, avec lesquels les premiers avaient fait les jonctions des pièces, par des rivets posés à chaud assurant la véritable et définitive liaison des pièces entre elles (fig. 118).

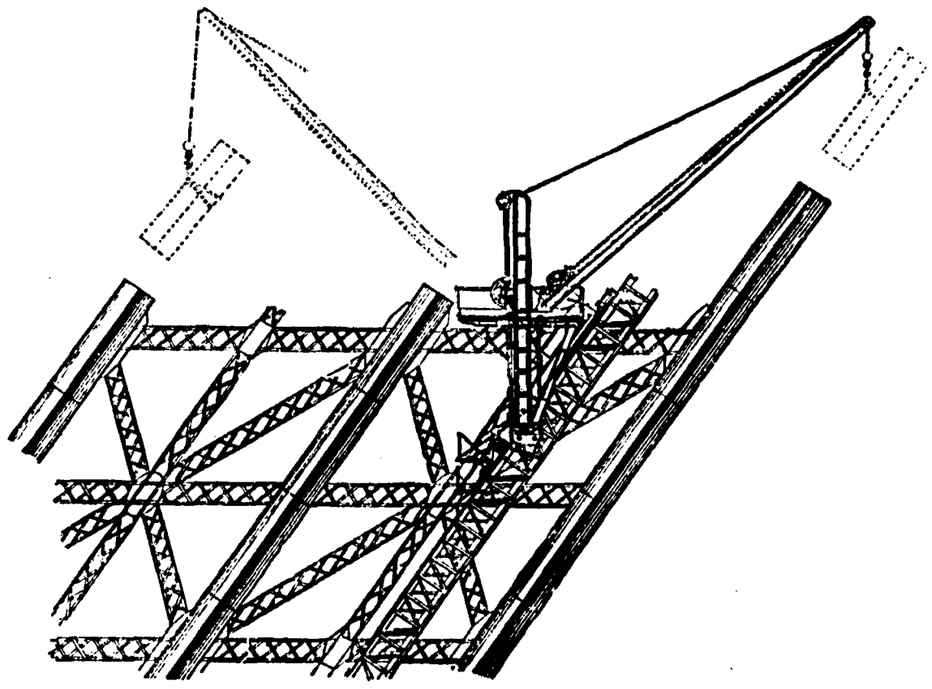


Fig. 118.

Au-dessous de chaque grue, au niveau des entretoisements horizontaux, on établissait un plancher presque général débordant en porte-à-faux sur tout le pourtour du montant. De plus, pour faire la rivure des joints et des assemblages, on se servait de petits échafaudages volants placés toujours à une faible distance du plancher général.

Le déplacement de ces planchers et de ces échafaudages s'opérait au moyen des grues.

Le montage des escaliers suivait autant que possible celui des montants, de sorte que les hommes, pour se rendre à leur poste de travail, se servaient de ces escaliers sur presque toute la hauteur du trajet et n'avaient à employer les échelles que vers la fin de leur ascension.

Pendant que, par les moyens que nous venons d'indiquer, on faisait le montage des quatre panneaux inférieurs des montants, on effectuait celui des premières poutres horizontales qui devaient les relier à 47,90 au-dessus du sol.

§ 7. — **Montage des poutres horizontales du premier étage** (Pl. XXV, fig. 15, 16, 17, 18).

Ces poutres ont 7,834 *m* de hauteur et font un angle de 63°,18' avec le plan vertical; elles sont situées dans les plans des faces extérieures et intérieures de la Tour et par suite distantes de 15 *m* d'axe en axe.

Des entretoises à treillis, ayant la même hauteur que les poutres, les relient deux à deux perpendiculairement. L'ensemble de ces poutres avec leurs entretoises ne pesait guère plus de 70.000 *kg* pour une face; mais ce qui rendait leur montage difficile, c'était la grande hauteur à laquelle on devait le faire et aussi la forte inclinaison des poutres qui obligeait à les étayer jusqu'au moment où on les avait reliées, deux à deux, par leurs entretoises. Enfin, par raison d'économie, les échafaudages sur lesquels on les montait n'avaient pas été établis sur la longueur entière des poutres, ce qui forçait à commencer le montage des poutres par la partie centrale et à les faire cheminer progressivement par les deux extrémités en montant en porte-à-faux leurs parties extrêmes jusqu'à leur rencontre avec les piliers principaux.

On avait construit à cet effet quatre échafaudages semblables, un dans chaque face de la Tour. Ils

avaient 41 *m* de hauteur et se composaient de neuf montants verticaux de 25 × 25, espacés de 7,50 *m* dans un sens et de 7,75 *m* dans l'autre. A cause des faibles charges que devait supporter l'échafaudage, on n'avait pas jugé utile d'enter ces poteaux sur des pieux battus dans le sol, comme cela avait été fait pour les échafaudages de butée; ils s'appuyaient simplement sur des semelles reposant sur le terrain. Ils étaient contreventés dans tous les sens par des croix de Saint-André formées par des bois de 0,22 *m* × 0,11 *m* et reliés horizontalement par sept cours de moises de 0,25 *m* × 0,12 *m*. Des contrefiches disposées à leur partie supérieure permettaient de donner à la plate-forme de montage 28,50 *m* de longueur sur 22,40 *m* de largeur. Enfin une autre série de contrefiches montant un peu moins haut que celles qui supportaient la plate-forme de montage soutenaient un cintre, qui servit plus tard à mettre en place la partie centrale des arcs décoratifs. Chaque échafaudage comportait 215 m^3 de bois, ce qui donnait un cube total de 885 m^3 pour les quatre, y compris 185 m^3 de platelage et 25 m^3 de calage.

Le prix de cet échafaudage est le suivant :

Bois	Le m^3 40^{fr},00
Déchets, coupes et joints, 5 %	2^{fr},45
Main-d'œuvre de taille, levage et démolition	34^{fr},00
	85^{fr},45
Faux frais, 5 %	4^{fr},30
Boulons, 10 *kg* à 0^{fr},35	3^{fr},50
	93^{fr},25

Soit pour l'ensemble de la Tour, 885 × 93.25 = 82.520^{fr},25 et environ 20.650 francs par échafaudage.

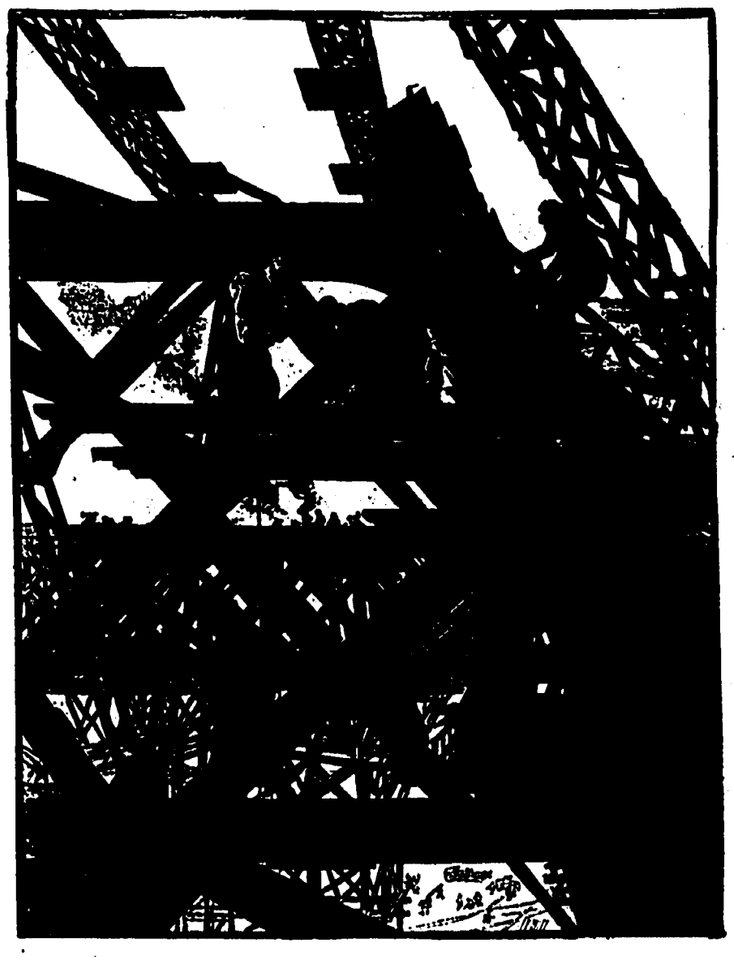


Fig. 110.

Le montage proprement dit des poutres horizontales n'offrait rien de particulier; il s'effectuait au moyen de chèvres établies sur la plate-forme. Quand il fut terminé, on procéda au raccord de ces poutres avec les montants.

C'était le moment particulièrement difficile de l'opération. Les quatre montants surplombant les échafaudages de butée d'un porte-à-faux d'environ 26 *m* semblaient, avec leur grande inclinaison, être sur le point de se renverser. Ils avaient à ce moment une longueur de 58 *m* et pesaient près de 400.000 *kg*. C'étaient ces grands prismes d'un poids énorme, dont les dimensions étaient voisines de celles des tours de Notre-Dame, qu'il s'agissait de manœuvrer de manière à les amener en contact avec les poutres horizontales avec lesquelles ils devaient se jonctionner, et il fallait arriver à opérer ces mouvements avec une précision telle que les trous de rivets percés à l'avance dans les goussets de jonction des poutres et des montants vinssent absolument en regard les uns des autres. C'est au moyen des boîtes à sable portées par les échafaudages de butée et au moyen des presses hydrauliques, que nous avons décrites précédemment, qu'on effectua cette manœuvre. Agissant tantôt sur un arbalétrier, tantôt sur un autre, soit pour l'abaisser, soit pour le relever, on arriva à obtenir le contact désiré.

L'implantation des quatre montants était si exacte, leur exécution si parfaite, qu'on put arriver à les assembler avec les poutres de ceinture sans qu'il fût besoin de donner un coup de burin pour retoucher les pièces en contact, ni un coup d'alésoir pour augmenter le diamètre des trous qui devaient recevoir les rivets d'assemblage (fig. 119).

C'était l'opération la plus délicate du montage de la Tour et, du moment qu'elle avait réussi, le succès final était assuré. Les montants étant réunis par les premières poutres-ceintures formaient comme une table solide, largement assise et dont la vue seule suffisait pour écarter toute crainte de renversement. On n'avait plus à redouter d'accident d'ensemble et les accidents partiels qui auraient encore pu se produire n'auraient pas été de nature à compromettre l'achèvement de la construction.

Une fois faite la jonction des montants et des premières poutres horizontales, la mise en place des

nombreuses poutres formant les planchers du premier étage, se fit sans aucune difficulté. Les hommes travaillaient sur des plates-formes en charpente, aussi commodément installés que dans un atelier. On arriva ainsi au niveau du premier étage, soit à 57,63 *m* au-dessus du sol du Champ-de-Mars.

§ 8. — Montage du premier au deuxième étage.

Le montage de la partie des montants comprise entre le premier et le deuxième étage (voir fig. 120) se continua comme pour la partie inférieure, au moyen des grues que l'on hissait progressivement sur les chemins des ascenseurs. Seulement, comme l'inclinaison des montants variait d'un panneau à l'autre, on était obligé de ramener les pivots des grues dans la verticale, chaque fois que l'on s'était élevé à la hauteur d'un panneau. Cette opération se faisait d'ailleurs avec la plus grande facilité, en manœuvrant la vis fixée à la base du pivot, ainsi que nous l'avons expliqué précédemment dans la description des grues de montage.

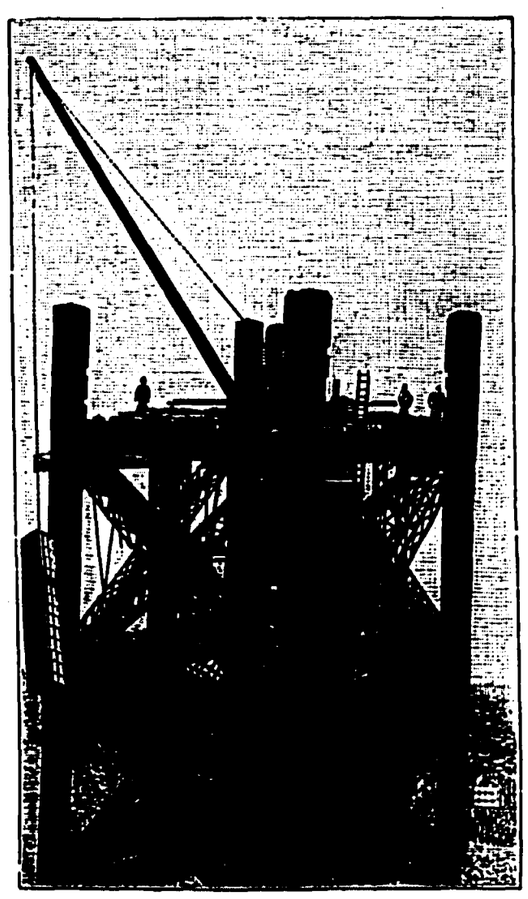


Fig. 120.

A mesure qu'on s'élevait, le temps nécessaire pour le levage des pièces augmentait; en outre, la chaîne de levage devenant beaucoup plus longue, ajoutait un poids important à celui des pièces que les grues soulevaient. Pour obvier à ces deux inconvénients : lenteur trop grande de la montée et augmentation des charges à hisser, on établit un monte-charge à vapeur au niveau du premier étage.

Ce monte-charge (voir fig. 121) était établi au bord intérieur de la partie du plancher du premier étage faisant face à l'École Militaire. A partir de ce moment, tous les matériaux étaient amenés par une voie au-dessous de ce monte-charge, au lieu d'être répartis entre les quatre montants comme précédemment. Attachés à la chaîne du monte-charge, ils étaient levés rapidement jusqu'au niveau du premier étage; arrivés là, ils étaient déposés sur des wagonnets qui, suivant une voie circulaire portée par le plancher du premier étage, allaient les conduire au droit du montant auquel ils étaient destinés, d'où il étaient repris par la grue de montage, qui les mettait en place (fig. 1 et 2, Pl. XXIV).

En opérant ainsi, on arriva jusqu'au deuxième étage, c'est-à-dire à 115,21 *m* au-dessus du sol.

§ 9. — Montage du deuxième au troisième étage.

On a vu, dans la description générale de la Tour, qu'à partir du deuxième étage, le système de construction change complètement. Les quatre montants distincts disparaissent, leurs faces extérieures se confondent deux à deux en une seule, de sorte que, jusqu'au troisième étage, la partie supérieure de la Tour forme une grande cage vide en forme de tronc de pyramide. Les chemins de roulement des ascenseurs n'existent plus, car le système employé pour la partie supérieure comporte des cabines suspendues et non plus des cabines roulantes. On voit, d'après cela, que la méthode mise en œuvre pour le montage devait, à partir du deuxième étage, être radicalement modifiée.

Il n'était plus possible de conserver les quatre grues. La section horizontale de la Tour allait d'ailleurs en se rétrécissant de plus en plus, et deux grues devenaient suffisantes pour desservir tous les points de la construction. Il s'agissait de leur constituer un chemin vertical, en remplacement du chemin de roulement des ascenseurs sur lequel elles s'étaient hissées jusque-là.

Dans l'axe de la Tour règne, du deuxième au troisième étage, un pilier vertical qui sert de guide principal aux cabines de l'ascenseur. Il est formé par une poutre en caisson dont les âmes à treillis ont 0,80 *m* de hauteur et les semelles 0,60 *m* de largeur. La largeur des semelles n'était pas assez grande pour

que celles-ci pussent servir directement de surface d'appui aux châssis des grues, lesquels avaient été construits pour glisser sur les poutres des ascenseurs inférieurs écartées de 3,80 *m*; mais, en appliquant sur ces semelles des cadres dont les bordures verticales présentaient précisément cet écartement de 3,80 *m*, on parvint à créer un chemin convenable pour le halage des deux grues qui devaient parachever le montage (voir fig. 122 ci-contre et la Planche XXIV, fig. 5 à 13).

Ces cadres ou châssis (fig. 8 à 12) étaient disposés de chaque côté du pilier-guide central des ascenseurs. Ils se composaient des deux poutres-bordures sur lesquelles on boulonnait le châssis des grues et d'une troisième poutre médiane qui s'attachait sur la semelle du pilier-guide. Ces trois poutres étaient reliées

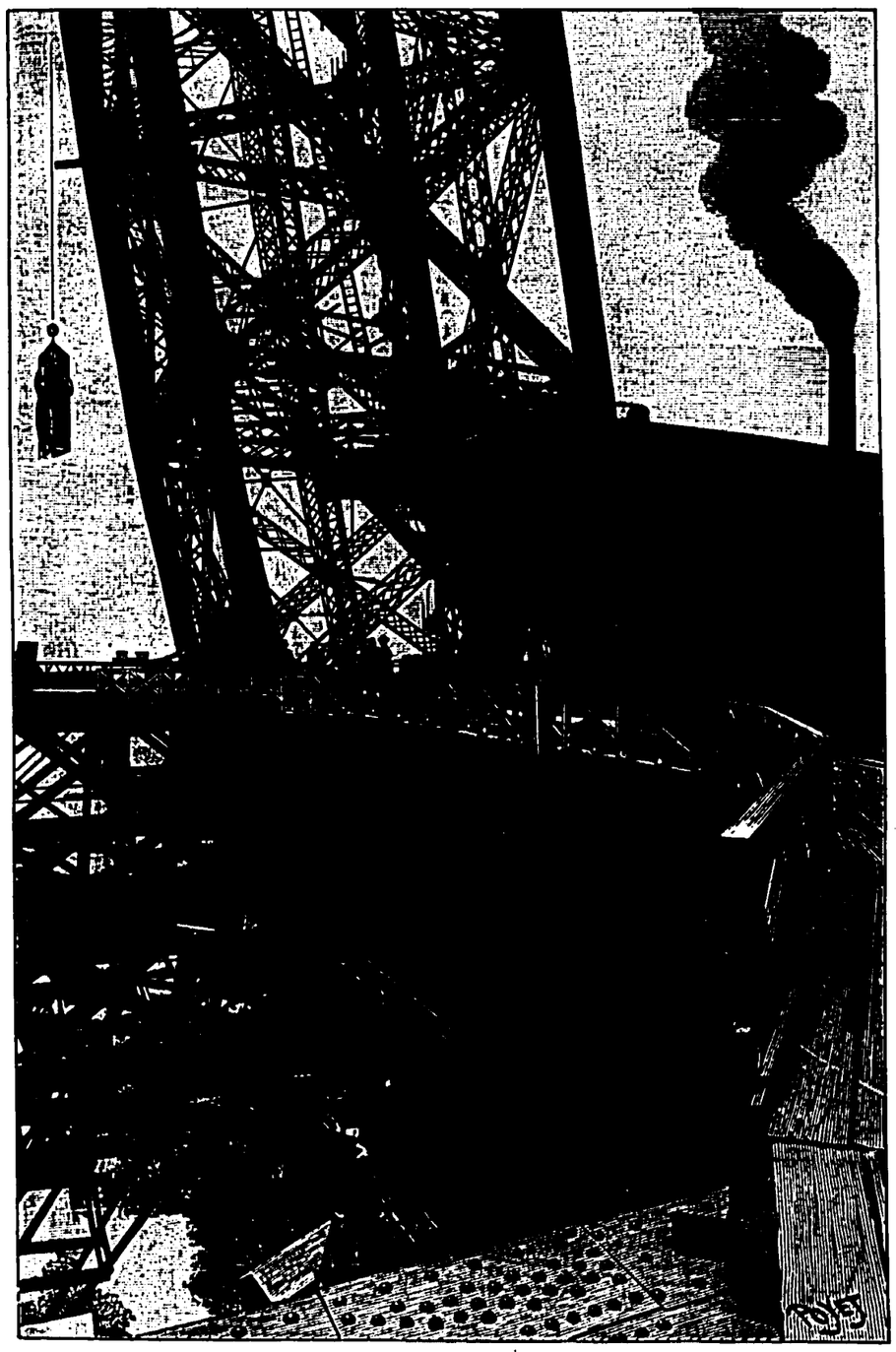


Fig. 121.

entre elles par des entretoises horizontales et une croix en cornières. La hauteur des cadres était 3 *m*. Trois cadres superposés jointivement formaient un chemin vertical de 9 *m* de hauteur, suivant lequel la manœuvre des grues pouvait se faire exactement de la même manière, et avec la même sécurité que sur les poutres des ascenseurs inférieurs.

Les cadres placés de chaque côté du pilier-guide étaient reliés latéralement par un treillis en cornières, de manière à former une cage rectangulaire, au milieu de laquelle se trouvait emprisonné le pilier central. On élevait simultanément les deux grues, qui s'équilibraient à vide et ne tendaient à faire fléchir le pilier que lorsque l'une d'elles seulement était en charge. La flexion du pilier était combattue d'abord par les grandes entretoises qui le relient, dans chaque plan d'entretoisement, aux angles de la Tour,

et ensuite par des contrefiches supplémentaires et provisoires qui, s'attachant par une extrémité sur la partie centrale de la grande entretoise, étaient fixées par l'autre extrémité aux arbalétriers de la Tour.

Quand les grues avaient parcouru un jeu de cadres de 9 *m*, on s'en servait pour disposer à l'avancement un second jeu de même hauteur à la suite du premier. On élevait les grues sur ces nouveaux cadres; les anciens devenaient disponibles, attendant qu'on vienne les démonter, toujours au moyen des grues, pour être remontés plus haut.

Le relevage des grues, y compris le déplacement d'un jeu complet de cadres de 9 *m* de hauteur, n'exigeait que trente heures, soit trois journées de dix heures avec dix hommes, temps assurément très court si l'on considère

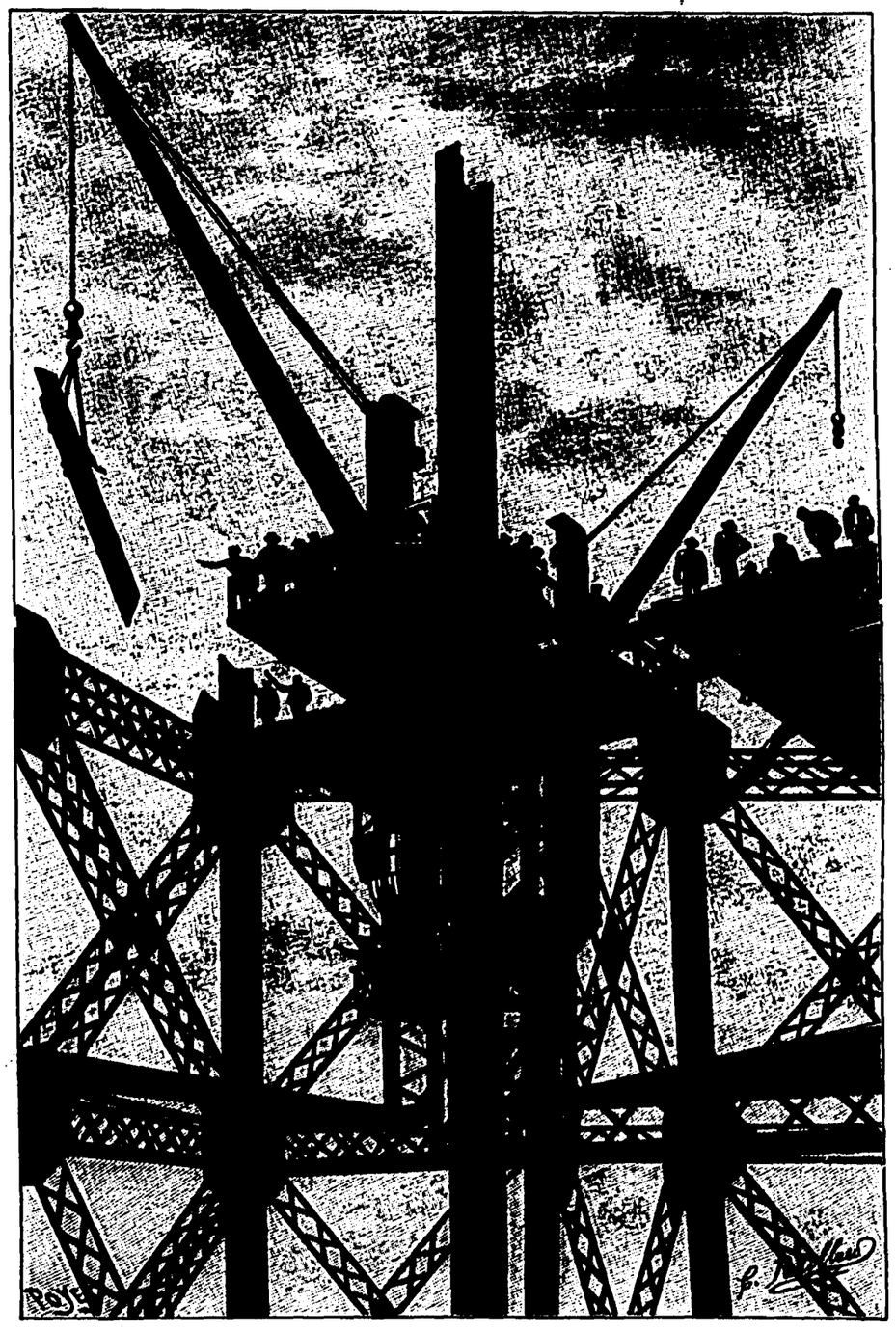


Fig. 122.

qu'il s'agissait de déplacer, par reprises successives, un ensemble d'engins dont le poids total atteignait 45.000 *kg*. Les grues une fois installées pouvaient, sans changer d'altitude, monter un panneau tout entier.

De même qu'on avait été conduit à installer un monte-charge à vapeur au premier étage, de même on dut en installer successivement un au deuxième étage, et enfin un troisième sur le plancher intermédiaire situé à 197 *m* de hauteur. C'est au niveau de ce plancher que les cabines des ascenseurs supérieurs se rencontrent et que se fait le transbordement des voyageurs.

En procédant comme nous venons de le dire, on arriva à la plate-forme du troisième étage à la fin de février 1889, et, un mois après, le montage était complètement terminé.

Les photographies 3 à 11 indiquent les différentes périodes du travail.

§ 10. — Dates relatives aux diverses phases de montage.

Les chiffres qui sont portés ci-dessous sont extraits des rapports hebdomadaires remis par le service du chantier.

a. Commencement du montage			1er juillet 1887	Durée, cinq mois.
Fin du montage des quatre premiers panneaux			4 décembre 1887	
Poids monté	1.343.298 *kg*	Moyenne par mois		268 *t*
Hauteur de la partie montée	47,90 *m*	»		9,58 *m*
b. Commencement du montage des poutres horizontales			18 décembre 1887	
Fin du montage des poutres du premier étage			1er mars 1888	Durée, trois mois et demi.
Achèvement de la première plate-forme			1er avril 1888	
Poids monté	1.796.792 *kg*	Moyenne par mois		512 *t*
Hauteur de la partie montée	14,20 *m*	»		4,05 *m*
c. Commencement du montage au-dessus du premier étage			1er avril 1888	
Fin du montage du deuxième étage			14 août 1888	Durée, quatre mois et demi.

(Le montage des arcs décoratifs s'est fait du 7 mai au 31 août et incombe, pour la majeure partie, à cette période.)

Poids monté	1.850.000 *kg*	Moyenne par mois	410 *t*
Hauteur de la partie montée	58,1 *m*	»	12,91 *m*

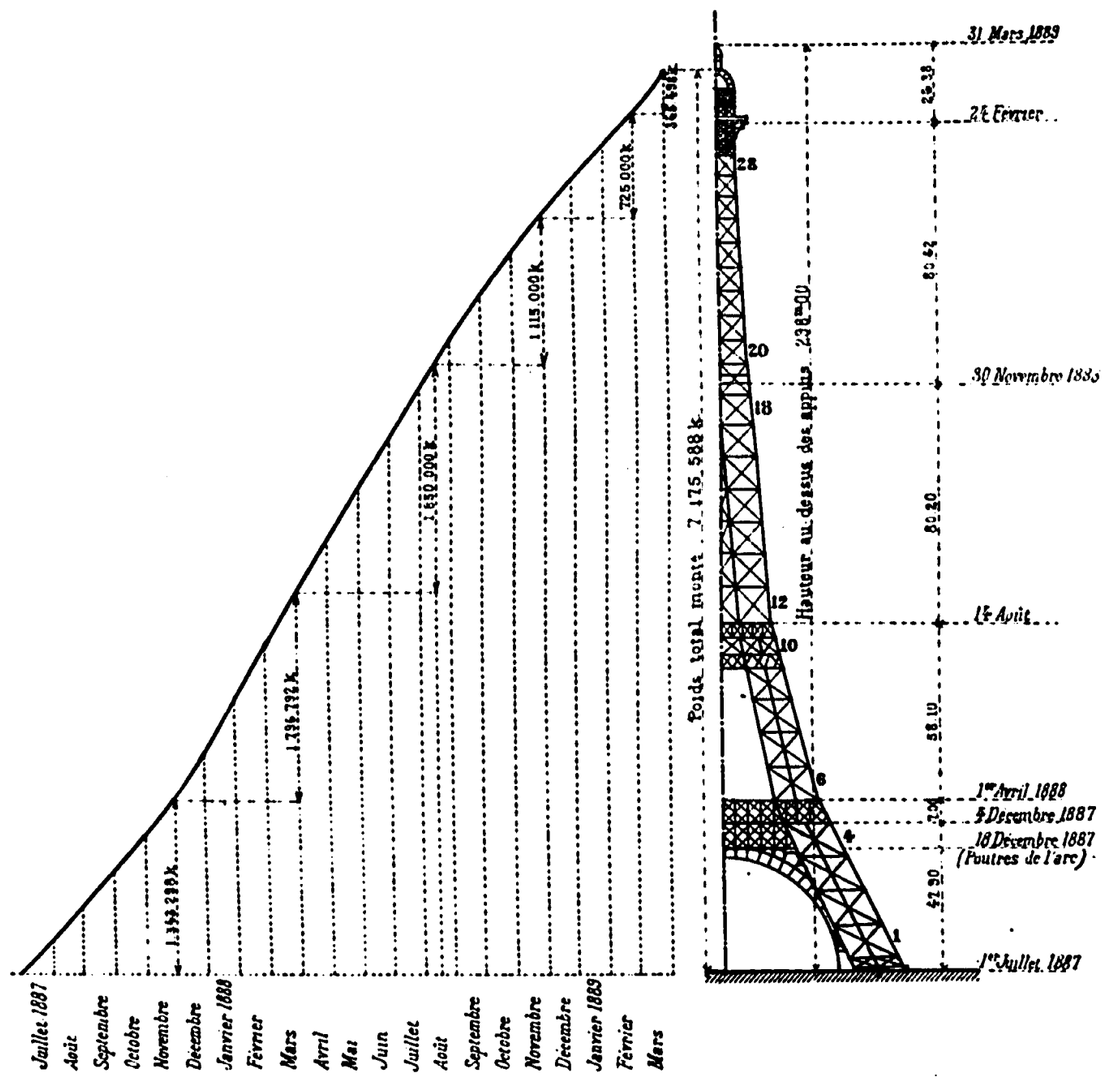


Fig. 123.

d. Commencement du montage au-dessus du deuxième étage		14 août 1888	Durée, trois mois et demi.
Fin du montage de la plate-forme intermédiaire		30 novembre 1888	

(Le montage des soubassements (164.492 *kg*) s'est fait de septembre à janvier 89, et incombe pour les 3/4 à cette période.)

Poids monté	1.115.000 *kg*	Moyenne par mois		320 *t*
Hauteur de la partie montée	80,20 *m*	»		22,91 *m*
e. Commencement du montage au-dessus de la plate-forme intermédiaire			30 novembre 1888	Durée, trois mois.
Fin du montage du troisième étage			24 février 1889	
Poids monté	725.000 *kg*	Moyenne par mois		242 *t*
Hauteur de la partie montée	80,42 *m*	»		26,80 *m*
f. Commencement du montage au-dessus du troisième étage			24 février 1889	
Arrivée au sommet			31 mars 1889	Durée, un mois et demi.
Fin du montage			15 avril 1889	

(Le montage des fers de la pile 3 (42.831 *kg*) s'est fait pendant cette période.)

Poids monté.....	345.498 *kg*	Moyenne par mois.....	230 *t*
Hauteur de la partie montée.....	24,38 *m*	»	16,25 *m*

En résumé, le montage comprenait :

Celui de la superstructure proprement dite, pour un poids de.....		6.911.802 *kg*
Plus celui des parties que nous avons mises en dehors de la superstructure, savoir :		
Poutres des cylindres Otis.....	56.463 *kg*	
Soubassements des piles.....	164.492 *kg*	
Charpente de la pile 3.....	42.831 *kg*	
Ensemble.....		263.786 *kg*
Total monté.....		7.175.588 *kg*

Ce montage a duré du 1er juillet 1887 au 15 avril 1889, soit vingt et un mois et demi, avec une moyenne de 334 *t* par mois. Le diagramme ci-contre, figure 123, indique la marche de ce montage, qui, un peu lent d'abord, a marché ensuite avec la plus grande régularité, moins rapidement néanmoins vers le sommet, en raison de la plus grande exiguité des plates-formes de montage.

Le poids ci-dessus ne comprend pas celui des appuis en fonte, qui est de 165.628 *kg*, ni celui des organes mécaniques des ascenseurs, lequel s'élève à :

Pour l'ascenseur Otis.....	311 *t* montées du 5 janvier au 13 juin 1889
» Roux-Combaluzier.....	397 *t* montées du 19 janvier au 8 juin 1889
Total.....	708 *t*

L'ascenseur Édoux a été monté par les monteurs du constructeur.

L'installation des machines et des pompes s'est faite du 11 février 1889 au 10 avril.

Quant à la durée partielle des opérations principales du montage de la superstructure, elle a été la suivante :

Montage d'un panneau au-dessous du premier étage.....	40 jours.
» » entre le premier et le deuxième étage.....	30 »
» » entre le deuxième et la plate-forme intermédiaire.....	15 »
» » au-delà, jusqu'au troisième étage.....	7 »

§ 11. — Rivure.

Le nombre total des rivets posés sur place, a été de 1.050.846. Le nombre posé par semaine a été très variable ; il a atteint, en août 1889, le chiffre important de 22.000 par semaine, avec 20 équipes de riveurs.

Ce nombre total est décomposé ci-dessous, suivant les mêmes périodes que celles prises dans l'historique du montage.

Période *a*. — 1er juillet au 4 décembre 1887 (montage des quatre premiers panneaux).....	189.580
» *b*. — 4 décembre 1887 au 1er avril 1888 (achèvement de la première plate-forme).....	235.809
» *c*. — 1er avril au 14 août 1888 (fin du montage de la deuxième plate-forme).....	283.898
» *d*. — 14 août au 30 novembre 1888 (fin du montage de l'intermédiaire).....	102.184
» *e*. — 1er décembre 1888 au 24 février 1889 (fin du montage de la troisième plate-forme)...	100.739
» *f*. — 24 février au 15 avril 1889 (achèvement du montage).....	50.808
15 avril au 1er juin 1889 (achèvement de la rivure).....	27.768
Total.....	1.050.846

Le nombre réel de jours de travail, du 1er juillet 1887 au 30 avril 1889, a été, comme il sera indiqué plus loin, de 635. Le nombre moyen de rivets posés par jour est donc de 1650, avec une moyenne de 16 équipes.

§ 12. — Organisation du chantier.

Le montage, tel que nous venons d'en résumer la marche générale, a été certainement l'une des parties les plus intéressantes de la construction.

C'était même, en grande partie, ainsi qu'il a été dit plus haut, sur les difficultés qu'il pouvait présenter, que s'appuyaient les détracteurs de la Tour. Il leur paraissait impossible d'arriver à édifier une construction de 300 mètres de hauteur, sans qu'une hécatombe d'ouvriers en fût la conséquence. Le vertige devait être tel que personne ne pourrait y résister : la mise en place des pièces sous les efforts du vent régnant à ces hauteurs, devait présenter des difficultés insurmontables, etc.

Rien de tout cela ne s'est produit et, à l'époque prévue, sans aucun à-coup et en restant dans les limites d'un programme parfaitement arrêté, tout a été terminé, sans qu'on ait eu à regretter un accident quelconque provenant des engins ou des échafaudages, d'une chute d'outils, de pièces ou d'ouvriers (1).

Les chutes d'outils étaient d'autant plus dangereuses que les ouvriers travaillaient les uns au-dessous des autres. Aussi, pour se préserver des graves conséquences qu'elles pouvaient avoir, on avait constitué toutes les plates-formes de travail par des madriers jointifs, et on les avait munies de rebords saillants.

Les chutes de pièces lourdes auraient eu, on le comprend, si elles s'étaient produites, des effets désastreux; aussi a-t-on, par une étude attentive des engins, et une surveillance constante des hommes, tout fait pour les éviter. Quant aux ouvriers eux-mêmes, on les installait autant que possible sur des plates-formes pleines, munies de garde-corps.

Ce beau et presque inespéré résultat, c'est-à-dire un tel montage effectué sans aucun accident grave, a été dû, pour la majeure partie, au soin avec lequel était organisé le chantier, et principalement à celui apporté au choix des hommes constituant les équipes qui se partageaient le travail. Ces équipes, complètement indépendantes et autonomes, avaient chacune leur chef spécial responsable de chacune d'elles, et n'étaient reliées que par la direction du chef de chantier. Une grande émulation régnait entre elles.

Le choix des hommes était tel, que leur maintien dans les équipes n'avait lieu qu'après un stage permettant de s'assurer qu'ils avaient les aptitudes exigées par le travail, qu'ils possédaient un caractère et une manière de faire semblables à ceux de leurs camarades, et que, en ce qui concernait les monteurs principalement, ils étaient agiles et prudents.

La composition des montants, à peu près semblable de bas en haut, avait permis de spécialiser les hommes dans chaque équipe, en les chargeant toujours des mêmes opérations.

L'amarrage des pièces, notamment, était fait par un amarreur toujours le même, sous la surveillance du chef de pile.

Chacun de ces chefs de pile ne devait jamais, sous aucun prétexte, quitter l'échafaudage de montage, et devait s'assurer par lui-même, avant que les hommes s'y installassent, que les échafaudages volants ou autres étaient solidement établis. Il est presque superflu d'ajouter qu'il y avait interdiction absolue d'apporter à boire sur le chantier, et qu'on procédait au renvoi immédiat de tout homme pris de boisson ou qui se querellait avec ses camarades pendant le travail.

Le montage dura vingt et un mois, pendant lesquels le travail ne s'est jamais arrêté, malgré deux hivers, dont la rigueur se faisait durement sentir à la grande hauteur à laquelle était situé le chantier. Tous les ouvriers, fiers de l'œuvre à laquelle ils collaboraient, admirablement dirigés par leur chef de service, M. Compagnon, et par le chef de chantier, M. Milon, qui tous les deux donnaient l'exemple et se montraient toujours aux endroits les plus dangereux, tous sans exception ont fait preuve d'une énergie et d'un courage au-dessus de tout éloge.

§ 13. — Personnel du chantier.

Ce personnel comprenait, en outre de M. E. Nouguier, ingénieur des travaux, et de M. Compagnon, chef de service :

1° Pour les bureaux, un caissier comptable (M. Balans), un pointeur, deux employés de bureau et un magasinier, soit cinq personnes;

2° Pour la conduite du chantier, le chef de chantier (M. Milon), quatre chefs de pile, un chef riveur, un chef charpentier, un chef bardeur et un chef forgeron, soit neuf personnes;

3° Pour le montage des piles, quatre équipes distinctes formées, pour la partie du travail du sol au deuxième étage, par un sous-chef d'équipe, deux charpentiers, six monteurs, sept manœuvres, un mousse, quatre équipes de riveurs, de quatre hommes chacune et composées du riveur, du frappeur, du teneur de tas et du mousse chauffeur (voir fig. 124), soit cent trente-deux hommes;

---

(1) Une seule chute d'ouvrier s'est produite; c'est celle d'un jeune garçon, qui, après la cloche sonnée pour la fermeture du chantier, courait imprudemment sur une des pièces de fer sur lesquelles le passage était formellement interdit, et qui est tombé de la hauteur des poutres du premier étage. Cette chute ne peut être mise à la charge du travail lui-même.

4° Pour les échafaudages, un chef charpentier, un chef d'équipe de levage, un chef d'équipe de taillage, huit charpentiers au taillage, six au levage, quatre manœuvres au bardage des bois, soit vingt et un hommes ;

5° Pour le bardage des fers, un chef d'équipe et sept manœuvres, soit huit hommes ;

6° Pour la forge, deux forgerons et leurs frappeurs, soit quatre hommes ;

7° Pour le magasin et le gardiennage, deux manœuvres, trois gardiens de jour, deux de nuit et deux mousses, soit neuf hommes.

Jusqu'au premier étage, la composition normale du chantier était ainsi de cent quatre-vingt-trois hommes, en dehors du service de bureau, et a été maintenue avec quelques variations, suivant les besoins du chantier.

A partir du premier étage, les quatre équipes des piles continuèrent à fonctionner comme précédemment.

L'équipe de bardage, par suite du fonctionnement du monte-charges du premier étage, se trouva augmentée de : un mécanicien, un monteur à chaque treuil, et, au sol, un amarreur.

A chaque installation de monte-charges, l'équipe d'approvisionnement s'augmenta du même nombre d'hommes.

Après l'achèvement des échafaudages, on forma une nouvelle équipe qui, sous la direction du chef charpentier devenu disponible, commença le montage de la galerie du premier étage ; aussitôt que les poutres du deuxième étage furent assemblées et les boîtes à sable enlevées, une partie de cette équipe démolit les échafaudages.

Au-dessus du deuxième étage, quand le nombre des grues en service se réduisit à deux, deux équipes devinrent disponibles.

Fig. 124

L'un des deux chefs d'équipe avec six charpentiers fut essentiellement affecté à l'installation des échafaudages de riveurs, dont l'importance était très grande et qui étaient complètement distincts de ceux des monteurs. Ces derniers devançaient toujours ceux des riveurs de la hauteur d'un panneau et avaient besoin d'appuis moins nombreux et moins solides. L'échafaudage de riveurs était, au contraire, un plancher continu entourant les arbalétriers extérieurs et couvrant tout l'espace intérieur ; il était muni de garde-corps, et les hommes pouvaient se mouvoir sans crainte, sur cette vaste plate-forme, comme s'ils eussent été sur le sol même.

A chaque panneau, ce plancher devait être relevé. Le relevage se faisait avec les grues et, autant que possible, à l'heure des repas.

Le second chef d'équipe resté disponible démonta les deux grues devenues inutiles et, aussitôt ce travail terminé, il commença le montage des arcs décoratifs.

§ 14. — Détails complémentaires sur la manœuvre des grues.

Le poids de chaque grue à vide atteignait 15.000 *kg* ; aussi la liaison du châssis aux poutres d'ascenseurs ne nécessitait pas moins de 170 boulons de 20 *mm* en acier.

La charge nominale de 3.000 *kg* a été souvent dépassée, et atteignait en réalité 4.000 *kg*. En effet, les tronçons du panneau 5, qui pesaient 3.200 *kg*, étaient suspendus par une chaîne à maillons calibrés de 22 *mm*, d'une longueur de 70 *m* ; comme son poids par mètre courant était de 11 *kg*, son poids total atteignait 800 *kg* environ avec le contrepoids. Aussi le treuil qui y était adapté était un treuil Bernier (chaîne calibrée engrenant sur une noix) de 4.000 *kg* de force. Mais on avait soin, pour diminuer la fatigue de la grue quand elle montait cette charge, d'orienter la volée vers l'axe de la Tour et de relever la flèche autant qu'il était possible.

Le hissage s'opérait quand on avait terminé le montage d'un panneau, dont la hauteur moyenne était de 11 *m*, et quand les poutres d'ascenseurs étaient mises en place et rivées. On s'assurait d'abord du contact des vérins de sécurité, puis, en orientant la grue vers l'axe de la Tour et en relevant au maximum la volée, on remontait la traverse, qui était rattachée aux poutres par 32 boulons en acier de 20 *mm*. On déboulonnait le châssis, et le hissage s'effectuait au moyen de six hommes agissant sur un levier de 1,25 *m*, engagé dans le cliquet de la vis de relevage. Chaque coup de levier relevait la grue de 12 *mm*. Tous les 0,50 *m* environ, les

calages de sécurité étant à bout de course, on plaçait 20 boulons et 10 broches dans le châssis et on reprenait les calages. Le relevage sur la hauteur d'un panneau durait environ dix-huit heures avec dix hommes et un chef d'équipe.

Dans la partie supérieure, le chemin des grues était formé par une double rangée de six châssis rectangulaires, interchangeables, de 3,96 *m*, de longueur, rattachés au poteau central par 384 boulons de 20 *mm* en acier; la longueur de ce chemin était de 23,77 *m*. Cette grande longueur de voie était motivée par la nécessité de répartir le poids de tout cet attirail de châssis et de grues sur une longueur suffisante.

Par surcroît de précaution, pendant le hissage des grues, on avait installé 4 palans à cordes mouflés à 3 brins, de 8.000 *kg* chacun. Ces palans étaient commandés par des treuils à tambour fixés sur l'entretoisement horizontal du panneau monté. Tout en aidant au hissage, ces palans étaient surtout disposés pour s'opposer au renversement et, au cas très improbable de rupture simultanée de la vis et du calage de sécurité, ils auraient pu supporter la charge de la grue.

Au fur et à mesure de la pose des tronçons du poteau central, on enlevait le châssis inférieur, qu'on replaçait à la partie supérieure du poteau, et le hissage de la grue s'effectuait comme sur les poutres d'ascenseurs. Pour résister au moment de torsion donné par le mouvement des cliquets pendant le hissage, les châssis étaient reliés par des barres rigides aux goussets d'attache des contreventements des tronçons des arbalétriers intermédiaires.

Cette manœuvre, qui était relativement délicate, s'est toujours opérée normalement et n'a jamais donné lieu à aucun accident. La chute des grues pendant l'un de ces hissages, aurait eu des conséquences si désastreuses, soit pour le personnel, soit pour l'ouvrage lui-même, qu'il aurait détruit en partie, que l'on avait accumulé pour l'éviter toutes les précautions matérielles possibles; l'opération, confiée aux hommes les plus sûrs et les plus éprouvés, se faisait avec la continuelle présence du chef de chantier.

La durée d'une opération de relevage sur une hauteur de 10 mètres avec dix hommes et un chef d'équipe, était d'environ trente heures, soit trois journées, dont une pour le changement de châssis et deux pour le relevage de la grue.

§ 15. — Échafaudages de montage et de rivure.

Le plancher des monteurs était composé de longrines en sapin de 25×25, réunies par un platelage en bastaings; il s'appuyait sur les entretoises et la diagonale existant à chaque étage.

Comme le joint des tronçons se trouvait généralement au milieu du panneau, il fallait, pour l'atteindre, un petit échafaudage spécial. Celui-ci avait des dimensions très réduites, 2,00 *m* de côté, environ; il était formé par quatre madriers et des planches légères, et porté par des boulons passés dans des trous de rivets du tronçon déjà en place, qu'on avait fait sauter avant le montage. Ces boulons étaient mis en place de l'intérieur du tronçon, auquel on accédait par les trous d'homme, et dans lequel on se hissait sur les goussets intérieurs. L'assemblage des tronçons sur ces petits échafaudages volants sans garde-corps était l'une des opérations qui demandaient le plus d'attention aux monteurs.

Au-dessus du deuxième étage, ce dispositif a été modifié, et on plaçait sur chaque face des petites sapines qui allaient d'un tronçon à l'autre et qui étaient attachées par des chaînes de levage.

La plate-forme des riveurs était constituée par un carré encadrant extérieurement les arbalétriers. Les côtés de ce carré étaient formés par deux cours de sapines de 20×20 distants de 1,10 *m* sur les faces extérieures du montant et 1,60 *m* sur les faces intérieures, en raison de l'inclinaison; ces deux cours de sapines étaient reliés par des traverses à l'écartement de 1,00 *m* et recouverts par des planches de 0,23 *m* de largeur et 25 *mm* d'épaisseur. Sur ces pièces de pourtour s'appuyaient, dans l'intérieur du montant, d'autres sapines, avec traverses et bastaings. Cette plate-forme constituait, pour le travail des riveurs, un vaste plancher jointif, entouré de solides garde-corps. Comme elle avait besoin d'être hissée à des hauteurs variables pour la rivure soit des jonctions du panneau, soit des joints intermédiaires des tronçons, elle était suspendue à l'entretoise supérieure par des cordages, que l'on avait faits en fil de fer pour éviter les risques d'incendie. Le relevage s'en faisait en grand par les grues.

§ 16. — Détails divers du montage.

Une des périodes les plus actives fut celle qui correspondit au montage simultané des montants et des poutres de la première plate-forme. Outre les grues des montants, il y avait deux chèvres installées par échafaudage, de sorte que l'on pouvait monter les fers à des hauteurs de 45 à 56 *m* par douze appareils à la fois. On a ainsi pu, malgré la mauvaise saison, monter pendant chacun des mois de janvier, février et mars, 650 *t* de fer. En raison des grandes difficultés du travail, ce tonnage est considérable.

Au fur et à mesure de la pose des solives dans la première plate-forme, les maçons établissaient le hourdis en briques creuses, système Perrière; on constitua ainsi une plate-forme absolument fermée sur laquelle on installa un nouveau chantier d'approvisionnement alimenté par le monte-charges à vapeur du premier étage; celui-ci comportait deux treuils Bernier actionnés par une locomobile de 12 chevaux.

En raison de son poids (6.000 *kg*), la première entretoise en treillis qui relie les piliers à la partie inférieure du panneau 10, fut assemblée sur le plancher du premier étage et mise en place à l'aide de deux grues amarrées à chaque extrémité.

Les poutres du deuxième étage furent montées en porte à faux par les grues. Les différences qui existaient dans l'écartement des piliers par rapport aux cotes calculées étaient absolument insignifiantes, et l'assemblage se fit par les moyens ordinaires, crics et broches. Un nivellement fait sur le sommet des tronçons ayant permis de reconnaître que l'horizontalité était parfaite, on put régler définitivement les cales placées entre l'appui à la base et le contre-sabot et s'assurer, au moyen de manomètres placés sur la pompe, que la charge sur chaque arbalétrier était sensiblement la même. Il n'y avait plus, dès lors, aucun inconvénient à enlever les boîtes à sable et à abandonner la construction à elle-même.

La démolition des échafaudages se fit sans aucune difficulté, en prenant sur les piliers de la Tour l'appui des poulies de retour des câbles servant à la descente des bois.

La partie des arcs placée entre les grands échafaudages et les pylônes, a été montée en porte à faux. Pour les parties intermédiaires, le montage en fut fait pendant l'assemblage des poutres du deuxième étage, sur l'échafaudage lui-même, qui avait été disposé à cet effet.

Le montage du panneau 13 et d'une partie du panneau 14 fut opéré avec la disposition des grues employée aux panneaux inférieurs, en hissant celles-ci au sommet des poutres d'ascenseurs qui dépassaient le niveau de la plate-forme.

On posait, pendant ce temps, avec des chèvres, la nouvelle voie sur le poteau central; quand elle fut en place, on y installa, à l'aide des grues des piles 2 et 4, qui s'arrêtaient à cette hauteur, les deux grues qui devaient monter jusqu'au sommet.

Comme cela avait été fait au premier étage, on établit au deuxième, et aussitôt que cela fut possible, le hourdis Perrière; on constitua ainsi une nouvelle plate-forme, qui reçut un deuxième monte-charges à vapeur pour l'approvisionnement des fers. Ce second monte-charges était à peu près semblable au premier, sauf que les pièces, à leur arrivée, soulevaient une trappe qui se refermait aussitôt la pièce passée, et sur laquelle venaient se placer les wagonnets destinés à recevoir la charge.

Une voie circulaire permettait de conduire les pièces sur les points les plus convenables pour être reprises par les grues.

Le montage du tronçon C des panneaux 13, 14 et 15, a été fait à l'aide des chèvres: on eût dû, en effet, donner aux grues une volée trop considérable pour atteindre ces points.

A l'altitude de 80 *m* au-dessus du deuxième étage, c'est-à-dire à la plate-forme intermédiaire, on établit un plancher en bois complet constituant une nouvelle plate-forme d'approvisionnement, que l'on munit d'un troisième monte-charges à vapeur semblable aux deux premiers, sauf qu'il ne comportait qu'un seul treuil.

Afin d'alimenter les machines de ces monte-charges et pour avoir toujours de l'eau sur les échafaudages en cas d'incendie, on installa un réservoir au deuxième étage, alimenté par une pompe Thirion. Une seconde pompe refoulait l'eau jusqu'à un autre réservoir situé à la plate-forme intermédiaire.

Au-dessus du troisième étage, les grues ne pouvant plus orienter, l'une d'elles fut démolie et, avec celle

qui restait, on monta les fers de la partie supérieure, qui furent mis en place à l'aide de chèvres. Finalement, pour la coupole du phare, on installa un bigueton avec un palan.

On se servit de la chèvre qui était installée, pour démonter la grue et monter tous les matériaux destinés à l'aménagement de cette plate-forme.

§ 17. — Montage des escaliers et des ascenseurs.

Les escaliers du sol au premier étage ne furent montés que vers le mois de novembre ; jusque-là, la circulation se faisait par un escalier en bois établi le long des poutres d'ascenseurs. A partir du premier étage, les escaliers en hélice étaient mis en place au fur et à mesure de l'avancement du montage.

Le montage des ascenseurs Combaluzier commença par la pose des gaines contenant le circuit des pistons articulés, qui fut faite par des treuils amarrés sur les piliers de la Tour. La seule difficulté qu'il présenta fut la mise en place des cylindres avec leurs plongeurs, dont le poids était de 12 *t*. Ils furent descendus dans la fosse avec les palans à corde de 8 *t* qui avaient servi au hissage des grues dans la partie supérieure. — Pour le montage des cabines, qui ne pouvaient pas passer dans les intervalles des treillis des montants, on dut dériver une entretoise médiane : chaque cabine fut roulée sur un plan incliné et rattachée au circuit, en passant par-dessus le soubassement (19 janvier au 2 juin 1889. — Mise en service les 26 mai et 2 juin).

Le montage des ascenseurs Otis commença le 5 janvier 1889, par la mise en place de la grande poutre de support des cylindres et du chariot de mouflage. On fit ensuite le montage des poutres du contrepoids et celui du mécanisme : celui-ci fut installé en maintenant au sol la cabine avec son appareil de sécurité, et en haut de leur course le contrepoids et le chariot du palan. Quand on eut opéré la liaison du cylindre au palan par l'intermédiaire des tiges de pistons, on effectua la pose des câbles. Après une certaine période d'essais, la mise en marche, pour le public, eut lieu le 4 juin par le pilier Nord, et le 19 juin par le pilier Sud.

Le montage de l'ascenseur Édoux commença le 20 février et fut terminé le 2 juin. — Toutes les parties de cet appareil ont été amenées à pied d'œuvre au deuxième étage, et à l'étage intermédiaire par nos monte-charges, où elles étaient reprises par les monteurs de la maison Édoux, qui les mettaient en place à l'aide de palans.

Les tronçons de cylindres en tôle, maintenus à leur tête par un collier portant sur la plate-forme, étaient au fur et à mesure de leur rivure, descendus dans leurs positions respectives. Quant aux plongeurs, dont le poids total aurait nécessité un engin de levage assez important, ils ont été immergés.

La mise en service de cet ascenseur a eu lieu le 13 juin.

§ 18. — Montage des Restaurants.

Les restaurants édifiés sur la première plate-forme ont été montés à partir du mois de janvier 1889. On commença par ceux des faces Paris et Grenelle ; on continua par celui du Trocadéro ; puis, le 15 avril, après la démolition du monte-charges, on put se mettre au restaurant du côté de l'École Militaire, dont il occupait l'emplacement.

Après cette démolition nécessaire, il restait encore à monter une quantité considérable de matériaux pour l'aménagement des étages, et à en évacuer une non moindre provenant des planchers, échafaudages, matières et matériels de toute nature. Aussi, on dut installer au premier étage toute une série de chèvres, constituer des équipes de nuit, et travailler avec une ardeur surexcitée par la proximité du délai final.

§ 19. — Cantine.

Lorsque la première plate-forme fut complètement terminée, on y installa une cantine pour le déjeuner des ouvriers.

Pour engager les ouvriers à y prendre leurs repas, la qualité des vivres était très surveillée. Les prix étaient diminués de 20 p. 100 sur les prix ordinaires ; cette différence était remboursée au cantinier par les bureaux du chantier. Cette dépense supplémentaire, dont le chantier prenait la charge, était compensée par

la suppression de la perte de temps due à la descente et à la montée des ouvriers, et par celle de la fatigue qu'elles leur occasionnaient.

La vente des alcools autres que l'eau-de-vie et le rhum, y était défendue, et son accès, en dehors des repas, était formellement interdit. L'installation d'une cantine au milieu du chantier eût été, en effet, une grosse imprudence, si on avait toléré que les hommes pussent y aller boire pendant le travail, l'excès de boisson étant, en effet, la cause de la plupart des accidents.

Cette cantine fut réinstallée au deuxième étage lorsque le plancher de cette plate-forme fut achevé.

Avec ces interdictions, la cantine eut de très bons résultats : elle permettait aux ouvriers de se reposer et de manger tranquillement pendant une heure, tout en ayant une alimentation saine et économique. Tous en profitèrent, et jamais il n'y eut lieu d'intervenir pour assurer le bon ordre ; les perturbateurs étaient certains d'un renvoi immédiat en cas de disputes.

§ 20. — Grèves.

Lors de l'inauguration du premier étage, qui fut célébrée par un banquet dans lequel je réunis tous mes ouvriers, je leur annonçai que je prenais à ma charge la retenue de 2 p. 100 qui, jusqu'alors, leur avait été faite sur leurs salaires pour payer l'assurance en cas d'accidents.

Mais cet encouragement, accueilli d'abord avec empressement, ne leur suffit pas, et, à partir du premier étage, ils manifestèrent à plusieurs reprises le désir d'une augmentation des prix de journées jusque-là pratiqués.

Cette augmentation n'était certainement pas motivée par la difficulté plus grande du travail ni par des manœuvres rendues plus périlleuses par l'augmentation de la hauteur. Les risques professionnels restaient les mêmes ; qu'une chute se produisît de 40 mètres ou de 300 mètres, le résultat est semblable : c'est la mort assurée.

Le vertige, qui pour le vrai monteur n'existe pas, est, dans tous les cas, dû à la sensation et à l'attraction du vide. Il était surtout sensible du sol au deuxième étage, dans les parties inclinées vers l'intérieur, où il n'y a rien pour arrêter la vue, et ne l'était plus à partir du deuxième étage, où l'œil rencontre toujours un réseau de pièces de fer s'entre-croisant. Quant à cette hauteur de 120 mètres elle-même, elle était loin d'être inusitée. La plupart des mêmes hommes, dans nos chantiers des ponts de Garabit et de la Tardes, avaient déjà affronté ces hauteurs dans des conditions plus périlleuses qu'à la Tour, sans qu'il se produisît de difficultés.

Néanmoins, les ouvriers cessèrent le travail le 19 septembre, et une délégation vint me trouver. Après diverses entrevues et un arrêt du chantier qui dura trois jours, il fut convenu que le prix de l'heure de chaque catégorie d'ouvriers serait, à partir de fin août, augmenté progressivement de 0,05 *fr* pour chaque mois jusqu'à concurrence de 0,20 *fr* comme maximum.

Le travail reprit sans incident ; mais, quand on fut arrivé à l'étage intermédiaire, le 20 décembre, c'est-à-dire à l'époque où l'augmentation progressive et mensuelle prévue par l'accord du 21 septembre allait atteindre son maximum, de nouvelles réclamations se produisirent, et une nouvelle grève eut lieu.

J'estimai à ce moment que, si je faisais une concession nouvelle, j'entrerais dans une voie pleine de périls, en donnant à mes ouvriers le sentiment qu'ils étaient indispensables à la bonne marche des travaux : des difficultés sans cesse renouvelées ne pourraient manquer de se produire par la suite sous un prétexte quelconque, au grand détriment de la discipline et du travail ; bien plus, l'achèvement de l'œuvre elle-même risquerait d'être compromis. C'est ce que j'exposai de la façon la plus nette à mes ouvriers, en leur déclarant que je repoussais formellement toute augmentation nouvelle. Pour leur montrer que j'étais guidé bien moins par des préoccupations d'argent que par la volonté du succès de l'œuvre commencée, je promis qu'une somme de 100 francs serait allouée à titre de gratification à tous les monteurs qui continueraient le travail jusqu'à la pose du drapeau. Je déclarai, en outre, que tous ceux qui ne seraient pas présents le lendemain à midi, seraient renvoyés et remplacés par de nouveaux monteurs.

La presque totalité, convaincue de ma ferme résolution, accepta, et quelques hommes, environ quatre par équipe, durent être remplacés par de nouveaux venus, qui montèrent de suite à 200 mètres, et qui, au bout d'une demi-journée, pouvaient faire le même service que les anciens. On acquit ainsi la preuve que avec de bonnes installations, un bon monteur peut, sans éprouver de malaise, travailler à n'importe quelle hauteur.

Quant aux meneurs, que j'avais déclaré n'avoir pas l'intention de renvoyer, mais me réserver de les employer à d'autres travaux plus faciles, je les plaçai dans les équipes qui faisaient le montage des arcades du premier étage, en leur interdisant, sous peine de renvoi, de monter au-dessus du premier étage. Cette mesure les froissa beaucoup plus qu'un renvoi; ils furent nommés ironiquement par leurs camarades *les indispensables,* et, peu de temps après, ils se firent régler.

Sauf ces deux incidents, qui furent vite et heureusement apaisés, je n'eus jamais qu'à me louer de tous mes ouvriers qui, comme je l'ai déjà dit, étaient très fiers de travailler à la Tour, et qui ont déployé pendant tout le cours du travail des qualités exceptionnelles d'énergie et d'endurance aux intempéries.

§ 21. — Prix des heures de travail.

D'après ce qui vient d'être dit, le prix des heures de travail a varié suivant les différentes périodes. Ces prix sont résumés dans le tableau suivant :

PÉRIODES.	CHARPENTIERS. fr.	MONTEURS ET RIVEURS. fr.	MANŒUVRES. fr.	MOUSSES. fr.
Jusqu'au mois de juin 1888	0,70	0,60	0,50	0,40
» juillet »	0,75	0,65	0,55	0,45
» août »	0,75	0,65	0,55	0,45
» septembre »	0,80	0,70	0,60	0,50
» octobre »	0,85	0,75	0,65	0,55
» novembre »	0,90	0,80	0,70	0,60
» décembre »	0,95	0,85	0,75	0,55
Pour tous les mois suivants	Id.	Id.	Id.	Id.

La durée du travail, que l'on prolongeait autant que le permettait la saison, était de douze heures pendant les mois de juin, juillet, août et septembre; de onze heures en mai et octobre; de dix heures en mars et avril; de neuf heures en novembre, décembre, janvier et février.

Exceptionnellement, en mai 1889, on a travaillé treize heures.

§ 22. — Tableau des heures de travail.

Le tableau ci-dessous résume, pour chaque période, le nombre d'heures de travail et le nombre de journées par catégorie d'ouvriers.

Ces chiffres résultent du dépouillement des rapports qui m'étaient adressés chaque jour par le chef de service du chantier.

NOMBRE DE JOURS EFFECTIFS DE TRAVAIL.	PÉRIODES.	NOMBRE D'HEURES DE LA JOURNÉE.	MONTAGE. — JOURNÉES DE				RIVETAGE. — JOURNÉES DE				BANDAGE. JOURNÉES DE			ÉCHAFAUDAGES ET INSTALLATIONS DIVERSES. — JOURNÉES DE			BUREAU. — JOURNÉES DE GARDIENS.	TOTAL DES JOURNÉES.	NOMBRE MOYEN D'HOMMES.
			CHARPENTIERS.	MONTEURS.	MANŒUVRES.	TOTAL.	RIVEURS.	FRAPPEURS ET TENEURS DE TAS.	MOUSSES.	TOTAL.	MONTEURS.	MANŒUVRES.	TOTAL.	CHARPENTIERS.	MANŒUVRES.	TOTAL.			
19	Du 11 juin au 29 juin 1887 inclus.	»	23	4	33	60	»	»	»	»	17	215	232	»	5	5	»	297	15,5
76	» 30 juin au 18 sept. »	»	388	2.060	731	3.179	381	762	385	1.528	502	1.070	1.632	1.959	902	2.861	242	9.442	124
12	» 19 sept. au 30 sept. »	»	149	507	203	859	93	186	125	404	16	192	208	261	88	349	60	1.880	157
29,5	» 1er oct. au 1er nov. »	»	109	701	1.460	2 270	440	880	528	1.848	»	633	633	1.104	287	1.391	172	6.314	212
37,5	» 2 nov. au 10 déc. »	»	20	1.140	1 716	2.885	602	1.204	736	2.542	»	684	684	2.111	512	2.623	221	8.955	238
40	» 11 déc. 87 au 22 janv. 1888	»	450	1.124	1.602	3.176	537	1.074	697	2.308	»	611	611	923	318	1.241	247	7.583	189
33,5	» 23 janv. au 26 févr. »	»	486	869	1.153	2.508	578	1.156	712	2.446	»	443	443	185	132	317	205	5.919	177
38	» 27 févr. au 8 avril »	»	484	928	1.713	3.125	713	1.426	869	3.008	»	495	495	218	245	463	271	7.362	194
26,5	» 9 avril au 6 mai »	»	302	669	1.115	2.086	390	780	493	1.663	»	252	252	193	165	358	183	4.542	171
52,5	» 7 mai au 30 juin »	»	676	1.253	1.768	3.697	751	1.502	961	3.214	»	403	403	348	377	725	322	8.361	159
59	» 1er juill. au 31 août »	»	833	1.260	1.518	3.611	1.056	2.112	1.287	4.455	»	448	448	377	479	856	229	9.599	162
8,5	» 1er sept. au 9 sept. »	»	105	166	152	423	147	294	179	620	»	63	63	71	38	109	51	1.266	149
18	» 10 sept. au 30 sept. »	»	320	430	577	1.336	166	332	226	724	»	149	149	140	171	311	127	2.647	147
30	» 1er oct. au 31 oct. »	»	410	722	908	2.040	241	482	349	1.072	»	232	232	169	239	408	186	3.938	131
10	» 1er nov. au 11 nov. »	»	122	194	316	632	91	180	109	380	»	79	79	35	122	157	67	1.315	131,5
19	» 12 nov. au 30 nov. »	»	212	323	613	1.148	204	376	230	810	»	191	191	57	369	426	114	2.689	142
55	» 1er déc. 88 au 27 janv. 1889	»	671	1.037	1.921	3.629	673	1.238	780	2.691	»	636	636	416	755	1.171	348	8.475	154
40,5	» 28 janv. au 10 mars »	»	603	955	1.821	3.379	472	860	551	1.883	»	505	505	299	494	793	251	6.901	170,5
26,5	» 11 mars au 7 avril »	»	364	608	1.026	1.998	322	588	372	1.282	»	372	372	256	328	584	168	4.404	166
30	» 8 avril au 10 mai »	»	1.426	1.280	1.848	4.554	346	632	436	1.414	»	591	591	576	385	961	362	7.882	262
16	» 11 mai au 30 mai »	»	682	540	981	2.203	124	192	136	452	»	306	306	151	118	269	175	3.405	213
15,5	» 31 mai au 16 juin »	»	256	161	256	673	1	2	2	5	»	70	70	47	36	83	75	906	58,5
13	» 17 juin au 30 juin »	»	151	54	2	207	»	»	»	»	95	28	123	52	23	75	71	476	36,5
705,5	Totaux.....		9.251	16.094	23.433	49.678	8.328	16.258	10.163	34.749	690	8.758	9.448	9.948	6.588	16.536	4.147	114.558	162,5

§ 23. — Dépense totale de la main-d'œuvre du 11 Juin 1887 au 30 Juin 1889.

Cette dépense est résumée dans le tableau suivant :

CATÉGORIES D'OUVRIERS POUR CHAQUE DIVISION DU TRAVAIL.	NOMBRES DE JOURNÉES PAR CATÉGORIE. PARTIELS.	NOMBRES DE JOURNÉES PAR CATÉGORIE. TOTAUX.	DÉPENSES CORRESPONDANTES. PARTIELLES. fr.	DÉPENSES CORRESPONDANTES. TOTALES. fr.	PRIX MOYEN DE LA JOURNÉE. fr.
Montage.					
Charpentiers	9.251		84.454,05		9,15
Monteurs	16.994	49.678	124.395,95	356.976,30	7,32
Manœuvres	23.433		148.126,30		6,32
Rivetage.					
Riveurs	8.328		59.060,65		7,10
Frappeurs et teneurs de tas	16.258	34.749	97.587,50	207.311,55	6,00
Mousses	10.163		50.663,40		4,98
Bardage.					
Monteurs	690	9.448	5.081,90	39.431,50	7,36
Manœuvres	8.758		34.349,60		6,20
Échafaudages et installations diverses.					
Charpentiers	9.948	16.536	77.815,55	119.656,10	7,82
Manœuvres	6.588		41.840,55		6,35
Bureau.					
Gardiens	4.147	4.147	22.371,45	22.371,45	5,39
		114.558		705.746,90	Moyenne 6,70

§ 24. — Main-d'œuvre des travaux spéciaux.

Les chiffres globaux qui précèdent peuvent être décomposés, d'après le dépouillement des rapports journaliers, suivant les diverses catégories de dépenses.

1° *Montage des soubassements des piles*, que nous avons compté dans le chapitre des fondations.

Ce montage, effectué du 23 septembre 1888 au 27 janvier 1889, employa 1.260 jours d'hommes et coûta 8.729,30 *fr*, suivant détail ci-dessous.

DIVISION DU TRAVAIL.	CATÉGORIES D'OUVRIERS.	NOMBRES DE JOURNÉES. PARTIELS.	NOMBRES DE JOURNÉES. TOTAUX.	DÉPENSES. fr.
Montage	Charpentiers	98	696	4.992,70
	Monteurs	211		
	Manœuvres	387		
Rivetage	Riveurs	141	564	3.736,60
	Frappeurs et teneurs de tas	282		
	Mousses	141		
Totaux		1.260	1.260	8.729,30

2° *Montage des ascenseurs Otis.*

Ce montage, effectué du 5 janvier au 13 juin 1889, employa 4.321 journées d'hommes et coûta 37.279,90 *fr*, suivant détail ci-dessous.

DIVISION DU TRAVAIL.	CATÉGORIES D'OUVRIERS.	NOMBRES DE JOURNÉES. PARTIELS.	NOMBRES DE JOURNÉES. TOTAUX.	DÉPENSES. fr.
Montage	Charpentiers	673	3.153	28.093,90
	Monteurs	880		
	Manœuvres	1.600		
Rivetage	Riveurs	292	1.168	9.186,00
	Frappeurs et teneurs de tas	584		
	Mousses	292		
Totaux		4.321	4.321	37.279,90

3° *Montage des ascenseurs Roux-Combaluzier et Lepape.*

Ce montage, effectué du 19 janvier au 8 juin 1889, employa 3.192 journées d'hommes et coûta 30.842,15 *fr*, suivant le détail ci-dessous.

DIVISION DU TRAVAIL.	CATÉGORIES D'OUVRIERS.	NOMBRES DE JOURNÉES. PARTIELS.	NOMBRES DE JOURNÉES. TOTAUX.	DÉPENSES. fr.
Montage	Charpentiers	869	3.040	29.558,15
	Monteurs	664		
	Manœuvres	1.507		
Rivetage	Riveurs	38	152	1.284,00
	Frappeurs et teneurs de tas	76		
	Mousses	38		
Totaux		3.192	3.192	30.842,15

4° *Installation des machines et pompes.*

Cette installation se fit du 11 février au 10 avril 1889. Elle employa 155 journées d'hommes et coûta 1.284,05 *fr*, suivant le détail ci-dessous.

DIVISION DU TRAVAIL.	CATÉGORIES D'OUVRIERS.	NOMBRES DE JOURNÉES. PARTIELS.	NOMBRES DE JOURNÉES. TOTAUX.	DÉPENSES. fr
Montage	Charpentiers	29	155	1.284,05
	Monteurs	28		
	Manœuvres	98		
Totaux		155	155	1.284,05

5° *Pose des réservoirs et de la canalisation.*

Cette pose se fit du 11 mars au 1er Mai 1889. Elle employa 417 journées d'hommes et coûta 4.105,90 *fr*, suivant le détail ci-dessous.

DIVISION DU TRAVAIL.	CATÉGORIES D'OUVRIERS.	NOMBRES DE JOURNÉES. PARTIELS.	NOMBRES DE JOURNÉES. TOTAUX.	DÉPENSES. fr.
Montage	Charpentiers	172	369	3.691,90
	Monteurs	101		
	Manœuvres	96		
Rivetage	Riveurs	12	48	414,00
	Frappeurs et teneurs de tas	24		
	Mousses	12		
Totaux		417	417	4.105,90

Nous avons totalisé, dans le tableau ci-dessous, les nombres de journées par catégories d'ouvriers, pour ces travaux accessoires ainsi que les dépenses correspondantes.

DÉSIGNATION DES TRAVAUX.	MONTAGE. CHARPENTIERS.	MONTAGE. MONTEURS.	MONTAGE. MANŒUVRES.	RIVETAGE. RIVEURS.	RIVETAGE. FRAPPEURS ET TENEURS DE TAS.	RIVETAGE. MOUSSES.	NOMBRES TOTAUX DES JOURNÉES.	DÉPENSES. MONTAGE. fr.	DÉPENSES. RIVETAGE. fr.	DÉPENSES TOTALES. fr.
Soubassements	98	211	387	141	282	141	1.260	4.992,70	3.736,60	8.729,30
Ascenseurs Otis	673	880	1.600	292	584	292	4.321	28.093,90	9.186,00	37.279,90
» Combaluzier	869	664	1.507	38	76	38	3.192	29.558,15	1.284,00	30.842,15
Installation des machines et pompes	29	28	98	»	»	»	155	1.284,05	»	1.284,05
Pose des réservoirs et de la canalisation	172	101	96	12	24	12	417	3.691,90	414,00	4.105,90
Totaux	1.841	1.884	3.688	483	966	483	9.345	67.620,70	14.620,60	82.241,30

Dans le chapitre des échafaudages et installations diverses, il y a intérêt à séparer les dépenses incombant aux grands échafaudages proprement dits, de celles s'appliquant aux petites installations de chantier telles que les échafaudages de riveurs, leurs déplacements, les bigues et toutes autres manœuvres nécessitées

par le montage. Ce sont, en effet, ces dernières dépenses seules qui peuvent être considérées comme devant être directement affectées au montage et entrer dans son prix général.

Nous avons donné plus haut le prix des grands échafaudages ; la main-d'œuvre qui s'y rapporte est la suivante :

DÉSIGNATION.	JOURNÉES.			SOMMES.
	CHARPENTIERS.	MANŒUVRES.	TOTAL.	fr.
Pylônes. — Battage des pieux et charpente	1.836	984	2.820	18.426,70
Démolition	110	92	202	1.718,40
Grands échafaudages. — Taille et levage	3.408	505	3.913	20.308,40
Démolition	246	120	366	3.225,60
Totaux	5.600	1.701	7.301	49.739,10

En retranchant ce chiffre de 49.739,10 *fr*, de la main-d'œuvre totale pour échafaudages et installations diverses, laquelle est de 119.656,10 *fr*, d'après le tableau de la page 121, on obtient la somme de 69.917,00 *fr*, laquelle est spécialement applicable aux installations faites pour le montage.

§ 25. — Main-d'œuvre du montage de l'ossature.

D'après les chiffres qui précèdent, le tableau général de la main-d'œuvre, décomposé en travaux spéciaux ci-dessus détaillés et en montage de l'ossature, s'établit comme suit en nombre de journées :

NATURE DE TRAVAIL.	CATÉGORIE D'OUVRIERS.	NOMBRE TOTAL.	TRAVAUX SPÉCIAUX.	MONTAGE DE L'OSSATURE.	
				CHIFFRES PARTIELS.	TOTAL.
Montage	Charpentiers	9.251	1.841	7.410	42.265
	Monteurs	16.994	1.884	15.110	
	Manœuvres	23.433	3.688	19.745	
Rivetage	Riveurs	8.328	483	7.845	32.817
	Frappeurs	16.258	966	15.292	
	Mousses	10.163	483	9.680	
Bardage	Monteurs	690	»	690	9.448
	Manœuvres	8.758	»	8.758	
Échafaudages et installations diverses	Charpentiers	9.948	5.600	4.348	9.235
	Manœuvres	6.588	1.701	4.887	
Gardiens		4.147	»	4.147	4.147
Totaux		114.558	16.646	»	97.912

Il s'établit de même comme dépenses :

NATURE DE TRAVAIL.	DÉPENSES TOTALES. fr.	TRAVAUX SPÉCIAUX. fr.	MONTAGE DE L'OSSATURE. fr
Montage	356.976,30	67.260,70	289.355,60
Rivetage	207.311,55	14.620,60	192.690,95
Bardage	59.431,50	»	59.431,50
Installations diverses	119.656,10	49.739,10	69.917,00
Gardiens	22.371,45	»	22.371,45
Totaux	765.746,90	131.620,40	633.766,50

En résumé, le montage des 6,912 *t* composant l'ossature proprement dite a employé, pendant 705 journées effectives de travail, 97,912 journées d'ouvriers et a occasionné de ce chef une dépense de 633.756,50 *fr*. Ce qui donne par tonne une dépense de 92,00 *fr*, se décomposant comme suit :

	fr.
Montage	42,00
Rivetage	27,80
Bardage	8,50
Installations spéciales	10,20
Gardiennage	3,50
Total	92,00

§ 26. — Appointements des employés du chantier.

Ces appointements ont été les suivants :

Chef de service	400 *fr.*	par mois.
Chef de chantier	340	»
Caissier	300	»
Pointeur	275	»
Trois employés	575	»
	1.890 *fr.*	par mois.
Ce qui, pour vingt-cinq mois, donne la somme de	47.250 *fr.*	
Cette somme doit être augmentée de 25.000 *fr.* pour gratifications diverses, y compris celle de 3.000 *fr.* remise aux ouvriers	25.000	
Soit un total	72.250 *fr.*	

§ 27. — Matières.

Le prix des matières servant au montage, donné par la comptabilité, est le suivant :

Réparation et réfection des fers		71,10 *fr.*
Installations spéciales du bardage		1.223,90
Rivetage (charbon et eau)		3.770,70
Échafaudages et installations diverses	Achat 117.005,14 *fr.*	
	Revente 30.477,35	
Reste		86.587,79
Total		91.653,49 *fr.*
Dans ce total, les grands échafaudages (1.450 m^3 environ) entrent pour une somme d'achat, octroi compris, de		75.575 *fr.*
En y appliquant une somme de 20.000 *fr.* pour revente, le prix des matières des grands échafaudages s'élève à		55.575,00 *fr.*
En déduisant ce coût de la somme de		86.587,79
Il reste, pour le prix des installations spéciales		31.012,79

La dépense totale pour les matières du montage est donc de

Réparation et réfection des fers	71,10 *fr.*
Installations spéciales du bardage	1.223,90
Rivetage (charbon et eau)	3.770,70
Installations spéciales du montage	31.012,79
Total	36.078,49 *fr.*

Ce prix ne comprend pas la fourniture du matériel, notamment des grues et de leurs châssis, qui sera comptée ultérieurement, non plus que les dépenses générales à répartir.

En résumé, la dépense du montage proprement dit de l'ossature est la suivante :

Main-d'œuvre	633.756,50 *fr.*
Appointements des employés	72.250,00
Matières pour les installations spéciales	36.078,49
Total	742.084,99 *fr.*
Soit par tonne (6.912 *t*)	10,75 *fr.*

et ce non compris les grands échafaudages, pour lesquels la dépense a été de :

Matières (en tenant compte de la revente)	55.575,00 *fr.*
Main-d'œuvre (voir plus haut)	49.739,10
Total	105.314,10 *fr.*
Soit par tonne (6.912 *t*)	1,44 *fr.*

Le prix du montage de l'ossature, tous échafaudages compris, est ainsi de 847.399,09 *fr.* pour 6.912 *t*, soit 12.19 *fr.* par tonne.

QUATRIÈME PARTIE

ORGANES MÉCANIQUES

CHAPITRE I

DISPOSITIONS GÉNÉRALES

Pour faciliter aux nombreux visiteurs, sur lesquels on devait compter, l'ascension des divers étages de la Tour, il était nécessaire d'installer des organes mécaniques puissants, qui permissent de les transporter sans fatigue ni danger.

L'escalier allant du sol au premier pouvait, à la rigueur, suffire pour une partie importante des visiteurs de cet étage. Il n'en était déjà plus de même pour les petits escaliers en hélice du premier au deuxième étage, lesquels étaient beaucoup plus fatigants et plus susceptibles de causer du vertige. Enfin, du deuxième au troisième étage, l'escalier vertical en hélice présentait ces deux inconvénients d'une manière encore plus grave ; aussi était-il complètement interdit au public.

Des ascenseurs mécaniques s'imposaient donc : leur nombre et leur puissance devaient être proportionnés au chiffre des visiteurs prévus pour chaque plate-forme ; ce chiffre devait, naturellement, diminuer avec la hauteur de l'étage et avec l'augmentation du tarif d'ascension. Ainsi que nous l'avons dit plus haut, ce tarif était, en général, de :

2 francs pour le premier étage
3 » » second »
5 » » troisième »

Le premier étage, sur lequel étaient installés des restaurants, brasseries, etc., devait attirer le plus grand nombre de personnes ; aussi était-il desservi par deux ascenseurs spéciaux, capables d'élever chacun 100 personnes à chaque voyage et de réaliser 12 voyages à l'heure, de manière à monter en 10 heures un nombre de 12.000 personnes. Ces ascenseurs, installés dans les piliers Ouest et Est, étaient d'un système nouveau, dit à *pistons articulés*, de MM. Roux, Combaluzier et Lepape.

Pour le deuxième étage, on s'est adressé à la maison américaine Otis, qui eut à fournir les ascenseurs installés dans les piliers Nord et Sud ; ces ascenseurs étaient capables de transporter chacun, du sol au deuxième, avec ou sans arrêt au premier, 50 voyageurs et de réaliser environ 10 voyages avec le trajet total. Comme un arrêt au premier s'imposait, au moins pour la descente, l'un des ascenseurs devait faire le trajet direct en enlevant 5.000 voyageurs dans la journée et l'autre devait effectuer le parcours du premier au deuxième étage en faisant 14 voyages, c'est-à-dire en transportant 7.000 voyageurs. On pouvait ainsi amener au deuxième étage le même nombre de voyageurs qu'au premier, soit 12.000.

Pour l'ascenseur supérieur central, nous avons adopté un ascenseur Édoux à course fractionnée et avec changement de cabine à la plate-forme intermédiaire. Le nombre des voyageurs montés à l'heure devait être, en supposant 63 voyageurs dans la cabine, de 750 à l'heure, soit 7.500 pour 10 heures.

En résumé, l'ensemble des ascenseurs devait pouvoir élever :

12.000 personnes au premier étage
12.000 » au deuxième »
7.500 » au troisième »

Ce programme a été à peu près réalisé, mais, il est vrai, avec le concours des escaliers.

En effet, le nombre moyen des visiteurs a été d'environ 15.000 par jour, dont 5.000 pour le sommet et 10.000 à la deuxième plate-forme, 5.000 s'arrêtant à la première plate-forme. Seul le rendement de l'ascenseur Édoux est resté notablement au-dessous des prévisions.

D'une manière générale, il s'est produit une affluence de visiteurs beaucoup plus grande que ne le comportait le débit des ascenseurs, et il se formait, à chacun d'eux, des queues qui rendaient très longue et très laborieuse, une ascension au sommet. Aussi s'est-on promis à ce moment, que, si on se retrouvait à une nouvelle Exposition, il n'y avait pas à hésiter à faire des modifications aux installations existantes.

L'établissement de ces ascenseurs, qui tous étaient hydrauliques, devait entraîner comme corollaire l'installation de machines à vapeur et de pompes amenant l'eau dans les divers réservoirs placés sur la Tour et d'où elle devait se rendre aux différents cylindres.

Les ascenseurs Otis et Combaluzier sont desservis par des machines Wheelock et des pompes Girard construites par MM. de Quillacq, d'Anzin. L'ascenseur Édoux l'est par des pompes Worthington.

Les générateurs qui alimentent ces machines sont au nombre de quatre et peuvent fournir chacun à l'heure 1.500 *kg* de vapeur à 10 *kg* de pression. Ils sont tubulaires, du système Collet-Niclausse.

Toute cette installation mécanique est disposée dans le sous-sol de la pile Sud (n° 3).

Nous allons examiner en détail chacun de ces organes.

CHAPITRE II

ASCENSEURS HYDRAULIQUES, SYSTÈME OTIS

§ 1. — Principe de l'appareil

Deux ascenseurs de ce système sont installés l'un dans le pilier Nord, l'autre dans le pilier Sud. Le projet en a été établi par la Société américaine des ascenseurs Otis, qui a construit, dans ses ateliers de New-York, la presque totalité des pièces du mécanisme.

L'ascenseur Otis présente la disposition générale des appareils hydrauliques à système funiculaire : c'est-à-dire que la cabine est mue par un palan relié à un piston hydraulique. La puissance y est appliquée directement sur le moufle et la résistance sur le garant.

Ce dispositif a l'avantage de permettre la course très considérable de la cabine, soit 129,96 *m*, par un déplacement relativement faible du piston, soit 10,83 *m*, en employant un palan à 12 brins; mais, en revanche, il nécessite un grand effort, lequel, abstraction faite des frottements, est égal à douze fois l'effort de traction sur la cabine. Cet effort est obtenu par de l'eau sous une pression de 12 *kg* environ.

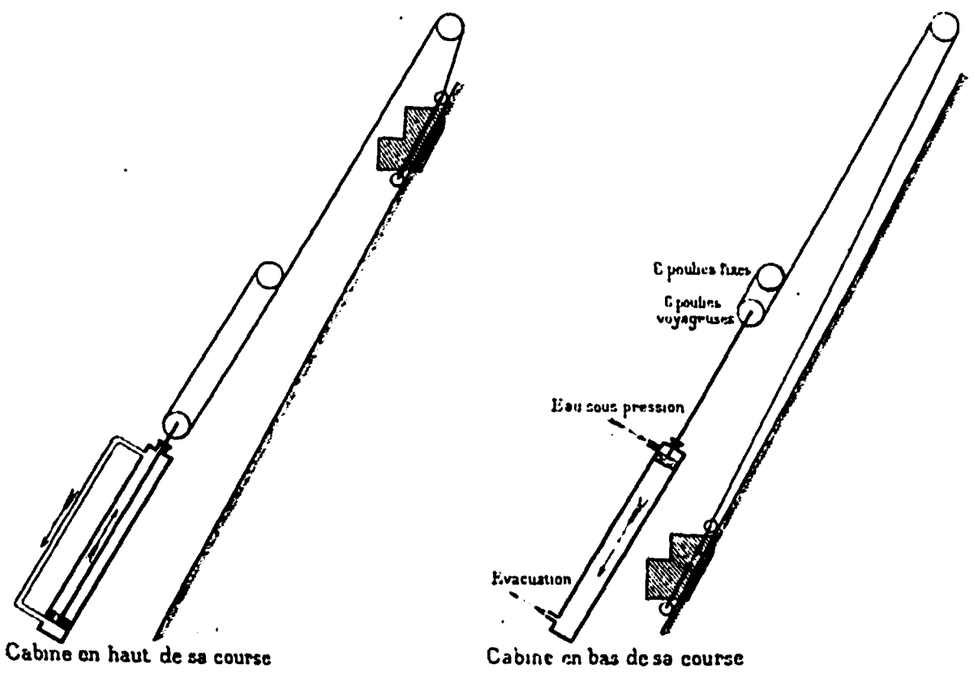


Fig. 125.

A la partie inférieure des piliers Nord et Sud de la Tour, est disposé un long cylindre incliné de 0,965 *m* de diamètre intérieur et de 13 *m* de longueur environ, dans lequel se meut le piston; au-dessus de celui-ci agit l'eau emmagasinée dans un réservoir situé sur la seconde plate-forme.

Deux tiges rattachent le piston à un chariot mobile, portant 6 poulies à gorge de 1,52 *m* de diamètre.

Le cylindre et la voie du chariot reposent sur deux poutres inclinées de 61° 20 sur l'horizontale et présentant une longueur de 40 *m*. A l'extrémité supérieure de ces poutres, sont installées 6 poulies fixes, en correspondance avec les poulies du chariot pour constituer un grand palan mouflé à 12 brins. Le dormant est fixé sur le sommet des poutres et l'extrémité du garant entraîne la cabine.

Pour diminuer l'effort de traction, on équilibre une partie du poids mort au moyen d'un contrepoids se déplaçant sur un chemin de roulement spécial, et on ne laisse à la cabine que l'excédent nécessaire, pour qu'elle puisse descendre seule à vide, en entraînant le chariot des poulies mobiles et le piston; car, ainsi que nous l'avons dit plus haut, la pression d'eau n'est jamais introduite que par le haut du cylindre, qui travaille à simple effet.

Ces premières indications suffisent à expliquer le fonctionnement général de l'ascenseur. Lorsque l'eau sous pression est introduite au-dessus du piston, celui tire le chariot de haut en bas, le garant passe sur un système de poulies de renvoi placées au deuxième étage et la cabine est entraînée en sens inverse (voir fig. 125).

Pour opérer la descente, on établit la communication entre le haut et le bas du cylindre : la cabine

descend alors sous l'action de son poids en faisant remonter le chariot du palan et le piston. Dans ces deux mouvements les tiges du piston travaillent toujours à la traction, c'est-à-dire dans les meilleures conditions, en raison de leur grande longueur.

Pendant l'arrêt, l'eau ne circule ni ne s'introduit dans le cylindre.

Le principe étant ainsi connu, nous allons étudier plus en détail cet appareil, représenté dans les planches XX, XXI, XXII, XXII^{bis}, XXII^{ter}, XXII^{4}.

§ 2. — Description de l'ascenseur

1° *Cylindre hydraulique.* — Le cylindre hydraulique de 0,965 *m* de diamètre intérieur et de 12,674 *m* de longueur totale (Pl. XXII, fig. 4 à 11 et 17 à 26) peut se diviser en trois parties principales : le corps du cylindre, le chapeau et le fond.

Le corps du cylindre (fig. 4) est constitué par quatre éléments tubulaires en fonte, assemblés au moyen de brides et de boulons avec joint étanche. Chacun de ces éléments a une longueur de 2.74 *m*. Le diamètre extérieur est de 1,065 *m*, ce qui donne, pour la fonte, une épaisseur de 50 *mm*.

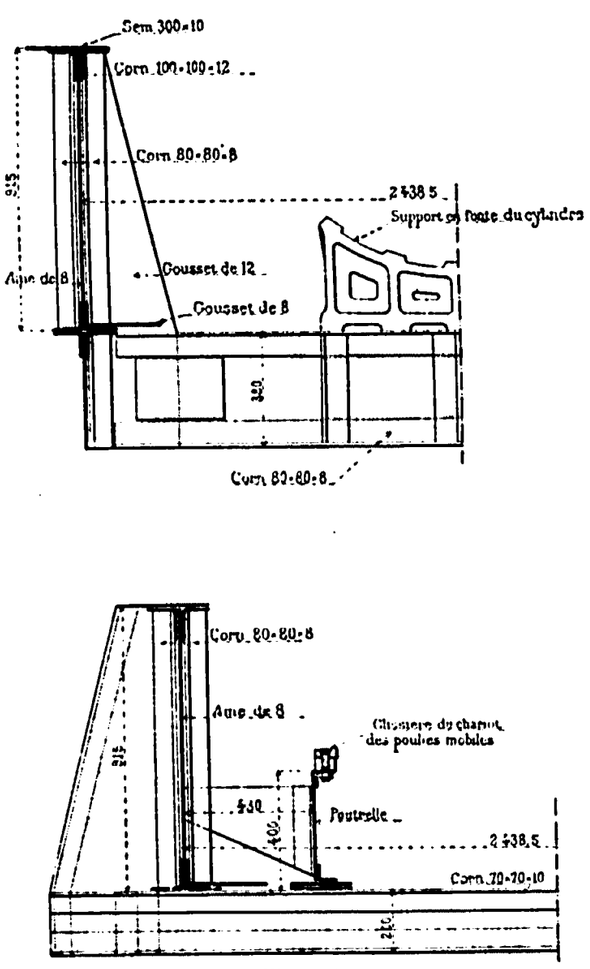


Fig. 126.

Sur l'élément supérieur est fixée une virole de 0,80 *m* de hauteur portant une tubulure à angle droit sur laquelle vient s'adapter le tuyau de communication avec le distributeur. Le cylindre repose au droit des brides, par l'intermédiaire de supports en fonte, sur des entretoises reliant deux poutres inclinées suivant un angle de 61°,20', de 39,35 *m* de longueur, qui servent aussi de chemin de roulement au chariot des poulies mobiles du moufle.

L'ensemble de cette charpente métallique est formé par deux poutres à âme pleine de 0,915 *m* de hauteur, suivant la figure 126, espacées de 2,439 *m* et reliées à leur partie inférieure par des entretoises et des goussets. Celles-ci, qui portent les cylindres, sont des poutrelles d'une hauteur de 0,380 *m*. Entre ces deux poutres principales sont disposés deux longerons, sur lesquels se déplace le support des tiges de piston, dont il sera parlé plus bas.

Cette charpente, dont le poids total est de 56.461 *kg*, est supportée à la partie inférieure par un sabot en fonte fixé sur un massif spécial (voir Pl. IV, fig. 23 et 24 et Pl. XXII, fig. 4) et par un corbeau prenant appui sur le mur séparatif des deux chambres de la pile. En outre, deux supports verticaux rattachent cette charpente à l'ossature de la Tour et prennent leur appui sur les entretoises horizontales des deux premiers panneaux du montant.

Le chapeau du cylindre (Pl. XXII, fig. 4, 22 et 23) s'adapte sur sa partie supérieure au moyen de brides et de boulons. Il comprend, dans son intérieur, les trois presse-étoupes livrant passage aux deux tiges du piston et à celle qui guide leur support. Il porte, en outre, un robinet purgeur d'air, un manomètre indiquant la pression de l'eau et une petite tige verticale (fig. 23), qui agit sur le clapet d'air fixé au piston (fig. 19), afin d'évacuer l'air qui pourrait s'accumuler à la partie supérieure du cylindre, et que l'on fait échapper à la main par un robinet purgeur.

Le fond du cylindre, également en fonte (fig. 17 et 18), a une hauteur de 0,648 *m* ; il est muni de nervures lui donnant une résistance suffisante. Dans son épaisseur est ménagé l'orifice du conduit de communication du distributeur, ainsi que celui du robinet purgeur qui permet de vider le cylindre.

Le cylindre repose, à sa partie inférieure, sur un sommier en fer de 0,75 *m* de hauteur, qui entretoise la partie inférieure des deux poutres inclinées de la charpente de support (fig. 4).

Dans l'intérieur du cylindre, se meut un piston creux en fonte (fig. 8, 9, 10 et 11), guidé par deux tiges de 108 *mm* de diamètre, fixées par des écrous à sa partie inférieure. Ces derniers, lorsque le piston est au bas de sa course, viennent se loger dans des cavités ménagées dans le fond du cylindre.

L'étanchéité entre le piston et les parois du cylindre est assurée par une garniture formée de tresses en coton suiffé, avec âme en gutta. Au-dessus et au-dessous du piston, suivant sa génératrice supérieure, se trouvent fixés deux appendices, A et B (fig. 4, 5, 6, 7 et 19, 20, 21), qui ferment automatiquement, mais d'une manière incomplète, les tubulures d'admission et d'évacuation, afin de ralentir la vitesse du piston quand il arrive à fond de course.

Un petit robinet permet d'évacuer l'air qui aurait pu se loger dans le cylindre moteur. A cet effet, le piston est creux et il porte à la partie supérieure un petit conduit muni d'un clapet (fig. 19). Quand le piston arrive dans le haut de sa course, la tige verticale portée par le chapeau vient ouvrir le clapet, et l'air va se loger à la partie supérieure du cylindre, d'où il peut être évacué par le robinet purgeur fixé sur le chapeau, dont nous avons parlé précédemment.

La course de ce piston étant de 10,83 *m*, les tiges qui y sont reliées, bien que ne travaillant qu'à la tension, comme nous l'avons fait remarquer, pourraient fléchir sous l'action de leur poids propre, ce qui tendrait à ovaliser les presse-étoupes; aussi a-t-on installé, pour les soutenir, une sorte de chariot mobile ainsi constitué :

Dans l'intérieur du cylindre, on a adapté un piston-support (fig. 24, 25 et 26), traversé à frottement doux par les tiges jumelées; à la partie extérieure, est disposé un coulisseau (Pl. XXII, fig. 29, et Pl. XXII^{bis}, fig. 17 à 24) mobile sur deux glissières continues. Le piston-support et le coulisseau sont reliés par une tige de 76 *mm* de diamètre, traversant le chapeau du cylindre dans un presse-étoupes, et dont la longueur est à peu près moitié de celle des tiges jumelées.

Quand le piston moteur est en bas de sa course, le piston-support soutient les tiges jumelées en leur milieu; quand il est à la partie supérieure, c'est le coulisseau extérieur qui remplit cet office.

En effet, dès que le piston arrive à la moitié de sa course, il pousse l'ensemble du piston-support et du coulisseau par l'intermédiaire de deux tiges de choc munies de rondelles de caoutchouc (fig. 25). A la descente, au contraire, c'est le chariot des poulies mobiles qui, dès que le piston est arrivé au milieu de sa course, pousse l'ensemble vers le bas.

2° *Distributeur*. — Les deux extrémités du cylindre hydraulique sont reliées par un tuyau, dit de communication, de 0,225 *m* de diamètre intérieur, sur lequel on a intercalé l'appareil de distribution (Pl. XXII, fig. 4, et Pl. XXII^{bis}, fig. 1).

Pour que l'ascenseur fonctionne à la montée, il est nécessaire d'admettre l'eau sous pression en haut du cylindre en même temps que l'on ouvre l'orifice de décharge.

Pour la descente, au contraire, il faut établir la communication entre le haut et le bas du cylindre, de sorte que l'eau ne fait que passer d'un côté à l'autre du piston par le tuyau de communication.

Enfin, pendant l'arrêt, l'eau ne doit ni circuler ni s'introduire dans le cylindre.

Ces trois phases de la manœuvre sont obtenues (voir le schéma, fig. 127, p. 130, qui représente les parties essentielles de l'appareil) au moyen d'un cylindre en fonte portant une bague en bronze de 0,229 *m* de diamètre intérieur, dans laquelle se meut un piston double P avec cuirs emboutis.

Le cylindre porte trois tubulures : celles situées du même côté correspondent, par le tuyau de communication, avec le haut et le bas du cylindre hydraulique; la troisième tubulure, sur le côté opposé, reçoit le tuyau d'amenée d'eau sous pression.

Le haut de l'appareil est terminé par une partie cylindrique d'un diamètre de 0,279 *m*, un peu plus grand que celui de la partie contenant le piston double P, et dans lequel se meut un second piston simple, P', fixé à la même tige et dont la face supérieure peut être successivement mise en communication avec l'eau sous pression, être complètement isolée et enfin mise en relation avec l'évacuation. Ces divers régimes sont produits à l'aide d'un servo-moteur constitué par un petit piston cylindrique, P'', de 44,5 *mm* de diamètre, dont le mouvement est intimement lié à celui des pistons P et P', au moyen des leviers représentés dans la figure 127.

Dans la position des pistons qui y est indiquée, la cabine se trouve arrêtée, puisque le piston P empêche l'eau de s'échapper du cylindre.

Si l'on produit une rotation dans le sens de la flèche, le piston P″ est soulevé ; l'eau, au-dessus de P′, s'échappe, et les deux pistons P et P′, en s'élevant à cause de l'excédent de surface de P′ par rapport à P, découvrent l'échappement du bas du cylindre moteur ; à ce moment, l'eau sous pression pesant sur la face supérieure de ce piston, celui-ci descend, et la cabine est entraînée de bas en haut.

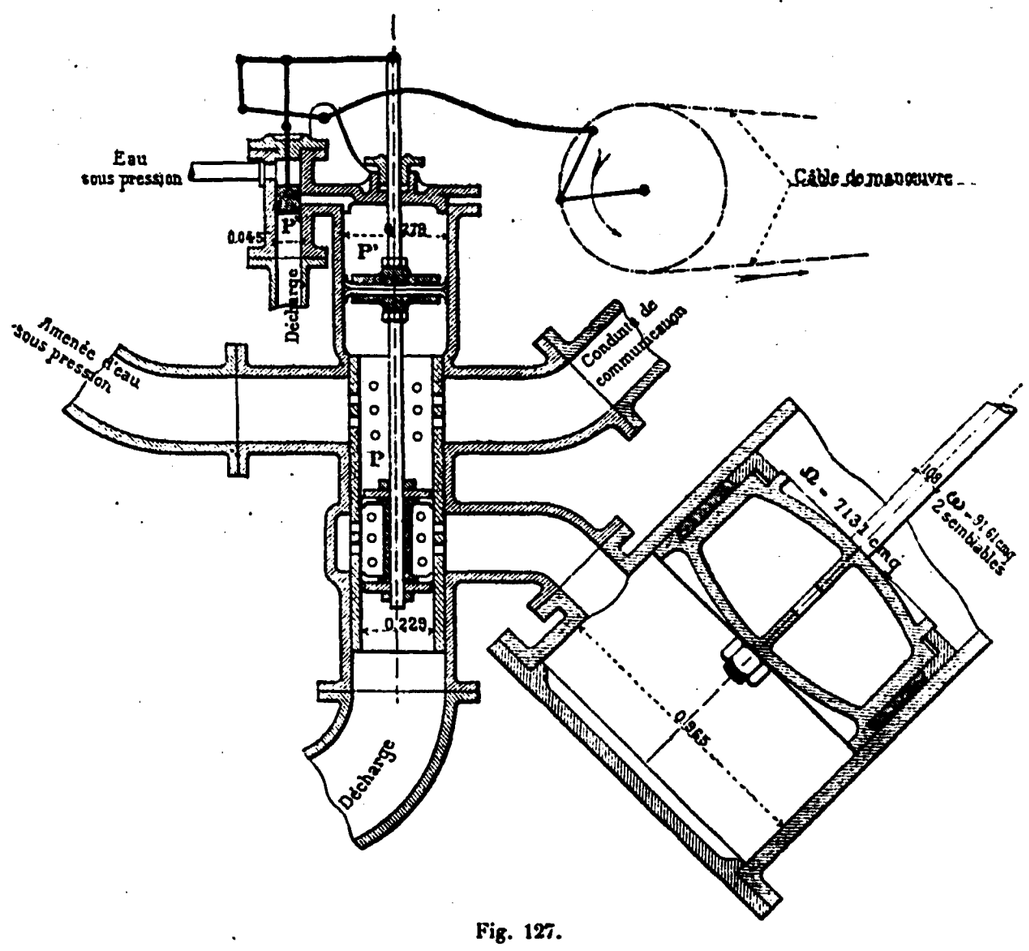


Fig. 127.

Si, en abaissant P″ par une rotation inverse, on met le dessus de P′ en communication avec l'eau sous pression, le piston P, pressé à sa partie supérieure, descend en entraînant le système et met en communication les deux faces du piston moteur. La cabine descend alors sous l'action de son poids en entraînant le piston et les poulies mobiles, l'eau ne faisant que circuler à travers le tuyau de communication, de dessus en dessous.

Dans l'exécution, les choses ne se passent pas tout à fait aussi simplement, et l'appareil réalisé est un organe extrêmement perfectionné, puisqu'il commande la mise en marche du piston moteur et, par conséquent, des cabines, par un déplacement très faible (12,5 *mm*) d'un piston qui n'a que 44,5 *mm* de diamètre, et cela à l'aide d'un effort presque insignifiant. Cet organe est vraiment l'âme de l'appareil et, pour ce motif, nous en parlerons avec quelque détail ; il est représenté dans la planche XXII, fig. 3, 4 et 27, et dans la planche XXII^{bis}, fig. 1 à 11.

Le piston P du schéma précédent se compose de deux parties (Pl. XXII^{bis}, fig. 1), qui sont : un piston plein inférieur de 0,233 *m* de hauteur, et un piston annulaire situé à 0,137 *m* au-dessus du premier et ayant la même hauteur. L'effet de ce dernier piston qui forme vanne et qui n'empêche pas la transmission de la pression au-dessus du cylindre, est de s'opposer à l'afflux trop rapide de l'eau sous pression ; son effet est donc de s'opposer à un démarrage trop brusque.

En outre, l'admission de l'eau sous pression se produit (fig. 3 et 4) dans des espaces ménagés par une série de cloisons brisant la vitesse de l'eau, qui est obligée de contourner leurs parois ; de plus, la couronne supérieure permet à l'eau de s'introduire des deux côtés à la fois ; cette eau se rend dans la conduite du cylindre par deux nouveaux orifices.

En outre, pour permettre le passage des cuirs emboutis du piston plein inférieur sur l'ouverture communiquant avec le bas du cylindre, cette ouverture est munie d'une grille formée par 224 trous de 9 *mm* de diamètre percés dans la chemise en bronze. Une couronne extérieure permet à l'eau de s'introduire sur tout le pourtour.

La course du distributeur est de 330 *mm*.

Enfin, le piston du servo-moteur est double et se trouve ainsi équilibré de manière à réduire l'effort sur le câble de manœuvre. La figure 3 de la planche XXII montre comment ce servo-moteur est mis en relation avec l'eau sous pression et la décharge.

Les leviers qui réunissent la tige du servo-moteur et celle des pistons distributeurs sont agencés de telle sorte que le piston du servo-moteur revient à sa position initiale dès que les pistons du distributeur sont arrivés à la position voulue pour produire l'arrêt, la montée ou la descente, au gré du conducteur.

Les schémas figures 5, 6 et 7 de la planche XXII^{bis} indiquent les positions du distributeur correspondant à la

descente, à l'arrêt et à la montée, suivant la position du piston du servo-moteur par rapport aux trous (fig. 2) de la chemise en bronze, dans laquelle il se déplace. La course de ce piston est de 25 *mm* et les trous ont un diamètre de 4,8 *mm*.

D'après ces explications, il est facile de suivre le fonctionnement de l'appareil.

Prenons la cabine au bas de sa course, ce qui correspond au piston hydraulique en haut du cylindre.

a. *Montée.* — Le système étant arrêté, le piston du servo-moteur bouche tous les trous V, et le piston

SCHÉMA DES TROIS POSITIONS DU DISTRIBUTEUR

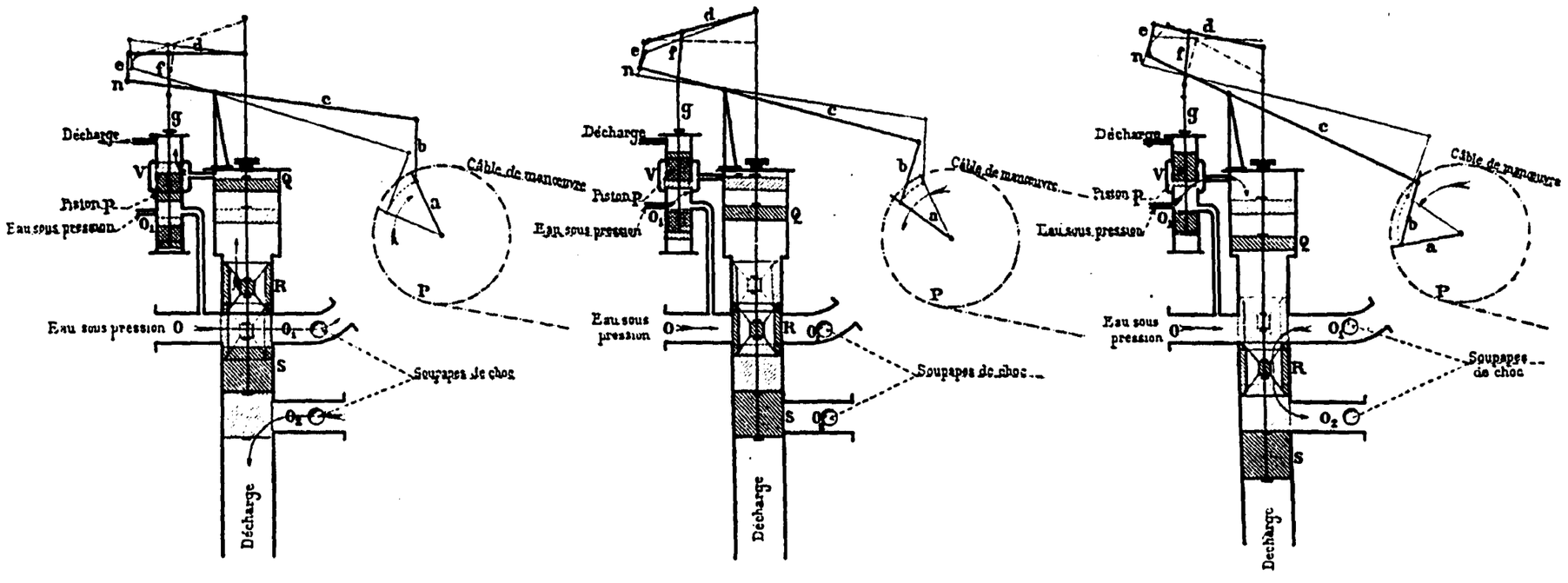


Fig. 128. — Montée.

Position initiale du distributeur		rouge
— finale	—	noire
Position initiale du servo-moteur		rouge
— intermédiaire	—	noire
— finale	—	rouge

Fig. 129. — Arrêt.

Position initiale du distributeur		rouge
— finale	—	noire
Position initiale du servo-moteur		rouge
— intermédiaire	—	noire
— finale	—	rouge

Fig. 130. — Descente.

Position initiale du distributeur		rouge
— finale	—	noire
Position initiale du servo-moteur		rouge
— intermédiaire	—	noire
— finale	—	rouge

NOTA. — Les positions finales du servo-moteur sont obtenues par la position des leviers *d*, *e*, *f*, en trait mixte rouge - · - · -

double, R, S, du distributeur obstrue les conduites O_1 et O_2 reliant le distributeur au haut et au bas du cylindre moteur (position rouge, fig. 128).

Le conducteur agit sur le câble sans fin de manière à abaisser le piston *p* du servo-moteur.

Ce mouvement a pour but de découvrir les trous supérieurs en V et, par conséquent, de faire communiquer le dessus du piston Q avec la décharge, tandis que le dessous communique avec l'eau sous pression. Le piston S supporte, au-dessus, le régime de l'eau sous pression, et, au-dessous, il est en relation avec la décharge ; par conséquent, le piston Q, ayant une surface supérieure à celle du piston S, tout l'équipage du distributeur remontera jusqu'à la position noire (fig. 128), où il s'arrêtera, car le piston du servo-moteur, par l'effet de la conjugaison des leviers qui le relient à celui du distributeur, reviendra boucher les trous supérieurs en V.

En effet, le piston Q, en remontant, entraîne l'extrémité du levier *d*, lequel tourne autour du point *n*, (extrémité du levier *c*) comme point fixe et produit une ascension du piston *p* par l'intermédiaire de la tige *f*; on a donc la fermeture des trous en V.

On voit qu'un mouvement donné du piston du servo-moteur produit un déplacement proportionnel de l'équipage du distributeur. Cette propriété est d'ailleurs la caractéristique des servo-moteurs.

Dans cette position du distributeur (position noire, fig. 128), le haut du cylindre moteur communique avec l'eau sous pression, et le bas avec la décharge; le piston descendra donc en entraînant le chariot des poulies mobiles, et produira la montée de la cabine.

b. *Arrêt.* — Le piston du cylindre arrivant au bas de sa course, l'oreille fixée au-dessous de celui-ci (A, Pl. XXII, fig. 4) commence à obstruer la communication avec la décharge, et par conséquent la cabine se ralentit.

Pour obtenir l'arrêt, le conducteur agit sur le câble de manœuvre de manière à produire l'élévation du piston *p* et par conséquent l'ouverture des trous inférieurs en V (position noire, fig. 129). Le piston Q reçoit l'action de l'eau sous pression sur ses deux faces. Le piston S communique au-dessus avec l'eau sous pression, au-dessous avec la décharge; donc il se produira un mouvement de haut en bas qui amènera les pistons R et S en regard des orifices O_1, O_2 (position noire, fig. 129). Dans le cylindre hydraulique, les orifices d'admission et d'évacuation étant fermés, on aura l'arrêt du piston et par conséquent l'arrêt de la cabine. Si cet arrêt a été brusque, les soupapes de choc, dont il sera question plus loin, se soulèvent pour amortir le coup de bélier.

c. *Descente.* — Pour la descente (voir fig. 130), le conducteur agit sur le câble de manœuvre dans le même sens que précédemment et détermine le soulèvement du piston *p* et, par conséquent, l'ouverture des trous inférieurs en V. Il se produit le même régime que précédemment; l'équipage du distributeur s'abaisse et arrive dans la position noire. Dans le grand cylindre, le dessus et le dessous du piston communiquent et la cabine, par son poids, remonte le piston et le chariot des poulies mobiles; il se produit un courant d'eau de dessus en dessous à travers la conduite de circulation, ce qui réalise la descente de la cabine.

Afin d'éviter l'influence des coups de bélier, chacune des conduites de communication avec le haut ou le bas du cylindre est mise en relation avec des soupapes de choc représentées planche XXII^{bis}, fig. 12. Ces soupapes sont maintenues par un ressort et soulevées en cas d'arrêt brusque; l'eau qu'elles évacuent va à la décharge.

3° *Distributeur de sûreté.* — Il existe, à la partie supérieure du tuyau de communication avec le haut du cylindre, un distributeur spécial destiné à arrêter le mouvement de la cabine quand le conducteur se trouve dans l'impossibilité de le faire. Un employé, placé sur une petite plate-forme couverte, est à poste fixe pour faire, en cas de besoin, cette manœuvre, qui est du reste très rare. Elle était commandée primitivement d'une façon automatique par un servo-moteur spécial, qui a été supprimé.

Ce distributeur est représenté dans la planche XXII, fig. 4, et dans la planche XXII^{bis}, fig. 13 à 16.

Si l'on veut arrêter la cabine en fermant la communication, on ferme le robinet R placé sur le tuyau de décharge et on ouvre le robinet R_1 permettant l'arrivée de l'eau sous pression à la partie supérieure du distributeur (fig. 13). Le piston supérieur est pressé également sur ses deux faces, et le piston inférieur *p* détermine la descente du piston P, qui ferme les ouvertures situées dans le plan AB : la communication est ainsi interrompue et le piston moteur s'arrête.

Pour rétablir la communication, on ouvre le robinet R du tuyau de décharge et l'on ferme le robinet R_1 de l'eau sous pression; le système s'élève en raison de la différence de diamètre du piston supérieur et du piston *p*, et les ouvertures deviennent libres.

4° *Conduites.* — La conduite de 250 *mm* amenant l'eau aux ascenseurs descend des deux réservoirs de la seconde plate-forme; elle est représentée figures 1, 2, 16 et 27 de la planche XXII.

Cette conduite porte, au voisinage du distributeur, un robinet vanne avec tuyau nourricier pour faciliter sa manœuvre. Elle se bifurque ensuite pour aller d'un côté au distributeur, et, de l'autre, elle se termine par une soupape de choc avec rondelles Belleville, destinée à éviter sur la canalisation les effets du coup de bélier résultant d'un arrêt brusque de l'ascenseur. L'eau ainsi évacuée est conduite par un tuyau de trop-plein au réservoir de décharge.

Deux tuyaux se greffent sur la conduite principale : l'un se rend au servo-moteur du distributeur et l'autre au distributeur de sûreté (Pl. XXII, fig. 27).

L'eau, au sortir du cylindre, se rend d'abord dans un réservoir de décharge placé derrière celui-ci (fig. 27), puis, par un tuyau de retour, à la pile 3, dans le réservoir des pompes, qui la reprennent pour la refouler dans les réservoirs du second étage.

5° *Mouflage et câbles de traction.* — Les deux tiges du piston moteur (Pl. XXII, fig. 30 et 32) sont reliées par leur partie supérieure au chariot portant les six poulies mobiles, par l'intermédiaire d'un palonnier triangulaire, auquel elles sont fixées par des axes de 102 *mm* de diamètre.

Ce palonnier est relié lui-même au chariot portant les poulies, par un axe de 134 *mm* de diamètre, maintenu entre des flasques rivées à ce chariot. Il est supporté par quatre galets de 0,505 *m* de diamètre moyen, se déplaçant le long de deux files de rails fixés aux grandes poutres qui supportent le cylindre.

Les poulies portées par le chariot mobile et dites *poulies voyageuses*, au nombre de six, sont disposées verticalement par deux groupes de trois; elles sont espacées de 0,483 *m* d'axe en axe et disposées en quinconce. Elles sont représentées en détail dans les figures 50 et 51 de la planche XXII^{bis}; leur diamètre est de 1,524 *m* et leur gorge porte quatre logements pour les quatre câbles composant un brin.

Chacun d'eux (1) a 23 *mm* de diamètre, 380 *m* de longueur et pèse 1,7 *kg* le mètre courant. Il est formé d'une âme en chanvre et de 8 torons comprenant chacun 37 fils d'acier n° 4 de 0,9 *mm* de diamètre. La section totale du métal est de 188 *mm*^{2}, et la résistance après câblage est, pour chacun d'eux, en moyenne de 22.000 *kg*. L'allongement à la rupture est de 2 p. 100.

Les extrémités des câbles qui constituent le dormant du mouflage (Pl. XXII, fig. 31) s'épanouissent au sortir de guides représentés figures 41 et 42, Planche XXII^{bis}, pour être saisis dans des mâchoires (fig. 43 à 46).

Ces mâchoires sont reliées par des tiges filetées permettant un certain réglage, aux extrémités de deux balanciers portés eux-mêmes par un palonnier général dont l'axe repose par un appui en fonte sur l'entretoise extrême supérieure des deux grandes poutres porteuses. Cette disposition a pour effet de répartir également les tensions entre les quatre câbles.

Les poulies fixes du palan sont semblables aux poulies voyageuses; elles sont au nombre de cinq et sont portées par des sommiers en fer fixés sur les grandes poutres. Elles sont disposées dans des plans obliques pour permettre le passage des câbles d'une poulie à l'autre.

A la sortie du palan, le garant est reçu par une poulie, *a*, semblable aux précédentes et formant le premier guidage. Il est ensuite reçu par les poulies de renvoi 1 et 2 (voir le diagramme, fig. 27 de la planche XXII^{bis} et la figure 131, page 134; pour les détails, les figures 34 à 37 de la planche ci-dessus) et par une poulie *b*, située vers le premier étage et qui le rejette dans la direction des arbalétriers supérieurs. Cette poulie de 1,20 *m* de diamètre est représentée dans les figures 47 à 49 et 53 à 55 de la même planche.

Il passe ensuite sur les poulies de renvoi n^{os} 3, 4, 5, 6 et 7, semblables à celles portant les n^{os} 1 et 2. Au-dessus du plancher du second étage, se trouve un pylône en fer portant quatre poulies C, D, C', D' (voir fig. 57 et 58 pour l'ensemble et de 59 à 67 pour les détails). A l'entrée de ce pylône, les câbles se divisent en deux groupes sur les poulies C, C', et, par l'inclinaison de celles-ci, sont dirigés sur les poulies D, D', qui leur donnent la direction nécessaire pour venir s'attacher deux à deux de chaque côté de la cabine par l'intermédiaire de l'appareil de sûreté dont il sera parlé plus loin.

Du pylône au premier étage, les câbles, par suite du changement de la courbure qu'ils doivent épouser, sont maintenus entre deux poulies, l'une supérieure, l'autre inférieure. Comme ces poulies indiquées au diagramme sous les numéros I à VII doivent livrer passage à la pièce de support des câbles (voir Pl. XXII$_{,,}$ fig. 10), elles doivent être disposées de manière que le câble reste maintenu par la face d'une troisième poulie qui se relève automatiquement au moment du passage de la cabine, sous l'action d'une cornière courbée portée par celle-ci.

Cet ensemble est représenté dans les figures 71 à 76 de la planche XXII^{bis}. La poulie intérieure s'élève autour d'un axe qui, au moyen d'un coude, comprime un ressort qui la ramène en sa position, quand la cabine est passée.

Du premier étage au sol, partie dans laquelle l'inclinaison est constante, les câbles sont guidés par les poulies désignées de A à F, représentées figures 68, 69 et 70.

Les unes et les autres poulies décrites ci-dessus reçoivent, en même temps que les deux câbles de traction, un des câbles du contrepoids dont nous allons parler.

6° *Contrepoids.* — Nous avons vu dans le paragraphe 1er que, pour diminuer l'effort sur le piston, on équilibre une partie du poids mort au moyen d'un contrepoids, en ne laissant à la cabine que l'excédent nécessaire pour qu'elle puisse descendre seule à vide, entraînant le chariot des poulies voyageuses et le piston; car, ainsi que nous l'avons expliqué, la pression d'eau n'est jamais introduite que par le haut du cylindre, qui travaille toujours à simple effet.

(1) Ces câbles avaient primitivement 10 *mm* de diamètre; ils étaient composés de 8 torons de 19 fils n° 5 1/2; leur effort de rupture était de 16.000 *kg*.

Le contrepoids est formé d'un truck chargé de gueuses en fonte (Pl. XXII$_4$, fig. 1 et 2), porté par six roues de 500 *mm* de diamètre moyen et qui se meut, depuis le sol jusqu'au premier étage, sur une voie parallèle à celle de la cabine (voir le diagramme, fig. 131).

Ce truck, d'une longueur de 11,245 *m*, est relié à la cabine par l'intermédiaire de deux câbles de 29 *mm* de diamètre (1) et de 260 *m* de longueur pesant 2,7 *kg* au mètre courant; ils sont composés d'une âme en chanvre et de 8 torons de 37 fils n° 6 de 1,1 *mm* de diamètre. La section de métal est de 281 *mm*^{2}, et la résistance moyenne après câblage de 32.000 à 35.000 *kg*.

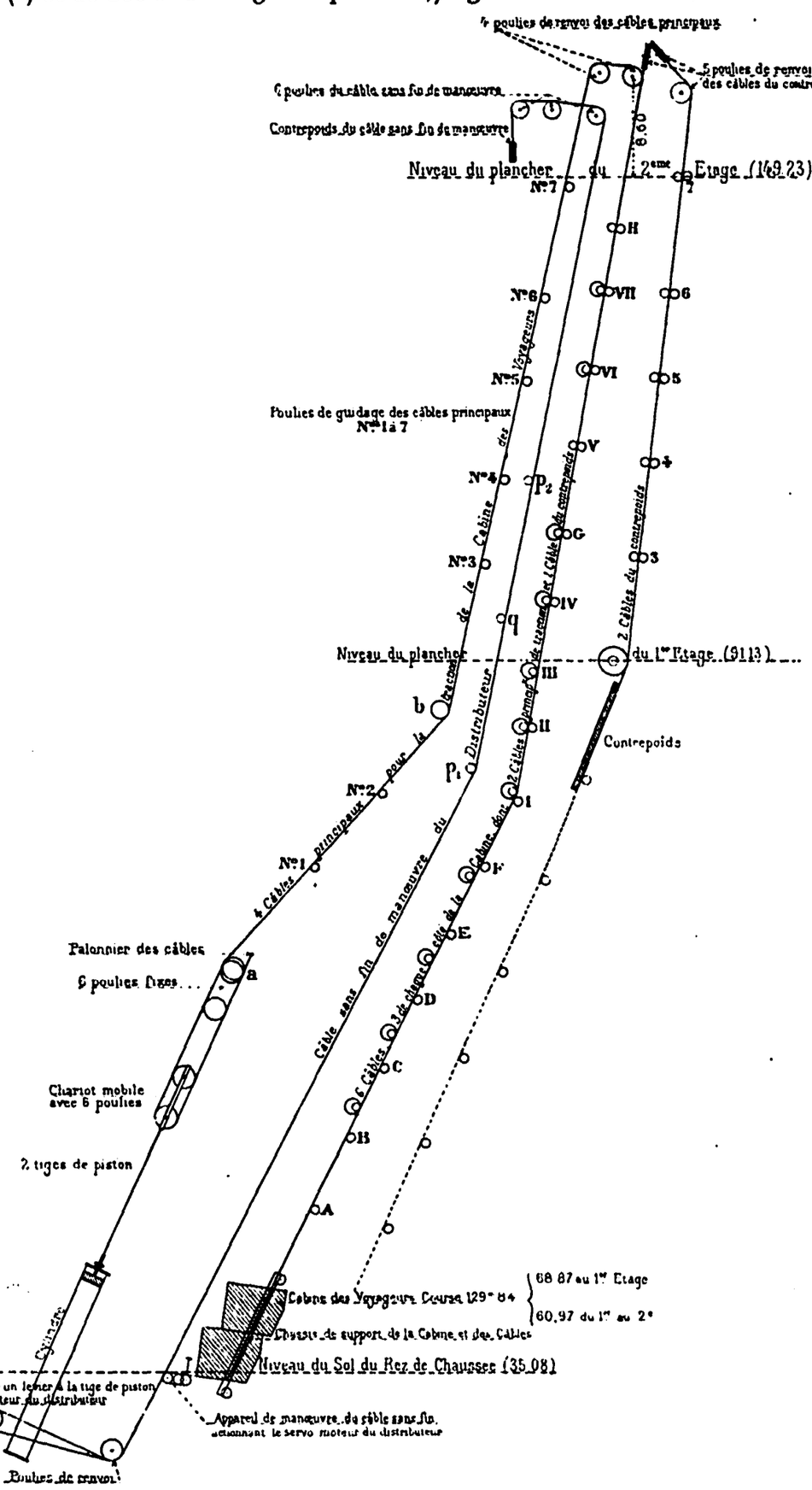


Fig. 131.

Ces deux câbles viennent s'attacher sur un palonnier P, fixé à une tige T, reliée au truck par l'intermédiaire d'un ressort (Pl. XXII$_4$, fig. 2). Cette tige fait elle-même partie de l'appareil de sûreté qui sera décrit plus loin.

Les deux câbles viennent passer sur la poulie fixe du contrepoids, de 1,161 *m* de diamètre (fig. 22 à 25 et 37 à 39) qui est fixée sur des sommiers en fer réunissant, dans la partie supérieure, le chemin de roulement du contrepoids (fig. 53, 57 et 58) à la poutre de l'ascenseur (2). Ils redescendent s'enrouler sur la grande poulie de 1,83 *m* de diamètre, portée par la partie supérieure du chariot (fig. 1, 2 et 59), de manière à former un mouffle à trois brins qui donne au contrepoids un déplacement égal au tiers de la course de la cabine, soit $\frac{129{,}96\ m}{3} = 43{,}32\ m$.

A la sortie de la grande poulie, les câbles sont renvoyés vers l'axe du chemin par la poulie n° 1 de 0,80 *m* de diamètre (voir fig. 48 à 52 pour sa position et de 40 à 47 pour les détails) et par la poulie n° 2 de 1,15 *m* de diamètre, placée au niveau du premier étage et qui les infléchit suivant l'inclinaison des arbalétriers entre le premier et le second étage (voir fig. 35 et 36 pour sa position et fig. 25 à 34 pour les détails).

De la poulie n° 2, les câbles passent entre les doubles poulies de guidage n° 3 à n° 7, représentées dans

(1) Les câbles avaient primitivement 23 *mm* de diamètre; ils étaient composés de 8 torons de 19 fils n° 8; l'effort à la rupture était de 23.500 *kg*.
(2) Cette poulie est représentée avec son inclinaison dans la figure 59, où elle est désignée par erreur sous le nom de « poulie de guidage n° 2 ».

leur position par les figures 69, 70, 71, 78 et 79, et dans leurs détails par les figures 72 à 77. Ils viennent à la partie supérieure sur la poulie de renvoi G de 1,372 *m* de diamètre (fig. 80 et 87 à 91), et se séparent à partir de ce point pour passer sur les deux poulies F qui ont le même diamètre que les précédentes et qui n'en diffèrent que par la jante, laquelle, recevant un seul câble, a la coupe figurée n° 92. La position de ces poulies est indiquée dans les figures 80-83 et 84.

Au sortir de ces poulies F, les câbles viennent passer sur les poulies E placées dans le plan du chemin de l'ascenseur et sont dirigées de part et d'autre de la cabine. Les poulies E sont semblables aux poulies F et leur position est indiquée figures 80, 81 et 82.

Les câbles se juxtaposent alors aux deux câbles de traction de chaque côté de la cabine et reposent sur les mêmes poulies de renvoi.

Pour compléter la description de ces guidages, il convient d'ajouter que les trois brins du mouflage sont supportés, au fur et à mesure de la descente du contrepoids, par des tambours D et F portés par le chemin de roulement du contrepoids et représentés dans les figures 59 et 62 comme position et dans les figures 60, 61 et 63 à 68 pour les détails.

7° *Cabines.* — Les cabines (fig. 1 et 2, Pl. XXII$_3$) se composent de deux caisses superposées dont la largeur intérieure est de 3,169 *m* et la hauteur de 2,13 *m*. La profondeur, au niveau du plancher, est de 2,75 *m* pour la cabine inférieure et de 3,60 *m* pour la cabine supérieure. Elles sont précédées d'une petite plate-forme découverte et la cabine inférieure porte en outre un poste destiné au conducteur qui effectue la mise en marche. Leurs parois postérieures suivent l'inclinaison du chemin de roulement, dans l'intérieur duquel elles pénètrent; leurs parois antérieures suivent également un plan parallèle situé à une distance de 3 *m* au-dessus du rail, suivant la normale au chemin.

Ces cabines sont destinées à recevoir 50 voyageurs, soit 25 pour chacune d'elles. Comme elles sont invariablement reliées au truck qui les supporte, elles prennent pendant leur course toutes les inclinaisons du chemin de roulement; aussi, à l'origine, tous les voyageurs devaient être assis sur des banquettes pour être autant que possible soustraits au mouvement transversal résultant de ce changement d'inclinaison. On a reconnu depuis que cela était inutile : une seule banquette a été ménagée dans le fond de la cabine et on a disposé quelques barres d'appui permettant aux voyageurs de se maintenir.

L'attache de la caisse des cabines au châssis a été disposée de telle sorte que dans leur position moyenne, c'est-à-dire à la station du premier étage, leur plancher soit sensiblement horizontal, afin de partager par moitié l'inclinaison qu'elles prennent en sens inverse aux deux extrémités du trajet, laquelle est environ de 0,20 *m* par mètre.

Chaque étage est desservi par une petite passerelle fermée par une porte roulante et aboutissant de la partie antérieure de la cabine aux escaliers d'accès et aux plates-formes.

Le conducteur, placé dans un abri en avant de la cabine inférieure, peut régler à chaque instant l'allure de l'ascenseur en agissant sur les deux brins du câble de manœuvre qui, par l'intermédiaire de poulies de renvoi, soulève ou abaisse le levier du servo-moteur.

Les caisses des cabines sont formées par une ossature en fers simple T de 51×38 (voir coupe EF, fig. 1, Pl. XXII$_3$) munis de fourrures en bois de 32×32, sur lesquelles sont fixées, à l'extérieur, des tôles minces, et à l'intérieur des voliges en bois garnies de lincrusta Walton.

Le plancher inférieur repose sur des fers en U de 0,152 *m* de hauteur espacés d'environ 0,65 *m*; sur ceux-ci sont fixées des lambourdes de 80×80 et, par-dessus, un parquet de 25 *mm* d'épaisseur recouvert de linoléum.

L'ensemble des deux cabines est porté par un grand châssis en fer formé par deux poutres en caisson de 8,39 *m* de longueur et de 0,20 *m* de hauteur, reliées à la partie supérieure par une poutre transversale de 3,488 *m* de longueur et à la partie inférieure par deux autres poutres transversales comprenant entre elles l'appareil de sûreté. Entre les flasques des poutres en caisson et à leurs extrémités, sont disposées les quatre roues porteuses de 0,66 *m* de diamètre représentées figures 11 à 15. Au châssis est fixée une armature en fer, en cornières de 62 *mm*, qui vient se boulonner sur l'ossature de la cabine. La partie postérieure des cabines est soutenue par des tirants rattachés à une poutre transversale.

De chaque côté de la cabine, les deux câbles principaux de traction et le câble du contrepoids viennent

s'infléchir dans l'intérieur d'une pièce en fonte fixée au châssis (fig. 2, 8, 9 et 10) et, au sortir de celle-ci, vont s'attacher séparément à l'appareil de sûreté. Comme cette pièce fait saillie sur les câbles, il a été nécessaire de disposer les poulies doubles de guidage situées entre le premier et le deuxième étage, de telle façon qu'elles livrassent automatiquement le passage, comme nous l'avons vu précédemment. A cet effet, le châssis porte une cornière courbée de 75×50, fixée à ses poutres principales au moyen de fers plats représentés planche XXII[3] (attache a_3, fig. 1).

Par suite de l'inclinaison de la cabine et de son porte-à-faux par rapport au chemin de roulement, il peut se produire, dans certaines positions de la surcharge des voyageurs, une tendance au basculement en avant de la partie supérieure. Pour le combattre, on a disposé, près des roues supérieures, des mâchoires M embrassant le rail (fig. 1 et 2, coupes GH, IJ). En outre, dans le cas où le rail serait arraché par la mâchoire, un solide étrier en fer, représenté en coupe et en élévation dans les figures placées au-dessus de la figure 2, viendrait s'appuyer sur la semelle supérieure elle-même du chemin de roulement.

8° *Câble et appareil de manœuvre de la cabine.* — Le câble de manœuvre qui sert au conducteur pour régler la marche de l'ascenseur est un câble sans fin dont la tension est assurée par un contrepoids P au deuxième étage (voir Pl. XXII[bis], fig. 83, 84 et 85).

Ces câbles ont un diamètre de 13 *mm* et sont formés de 8 torons de 12 fils n° 2 de 0,7 *mm* avec âme en chanvre. Leur longueur est de 160 *m* pour l'un et 195 pour l'autre; leur poids par mètre courant est de 0,43 *kg* et leur effort de rupture 5.000 *kg*.

A la partie inférieure, les deux brins entourent une poulie A, dont l'axe porte un levier agissant sur le servo-moteur (voir diagramme fig. 132 et 133) et s'engagent ensuite dans les poulies de l'appareil de manœuvre porté par la cabine. Les figures 79 à 82 représentent les différentes poulies de guidage sur lesquelles passe ce câble.

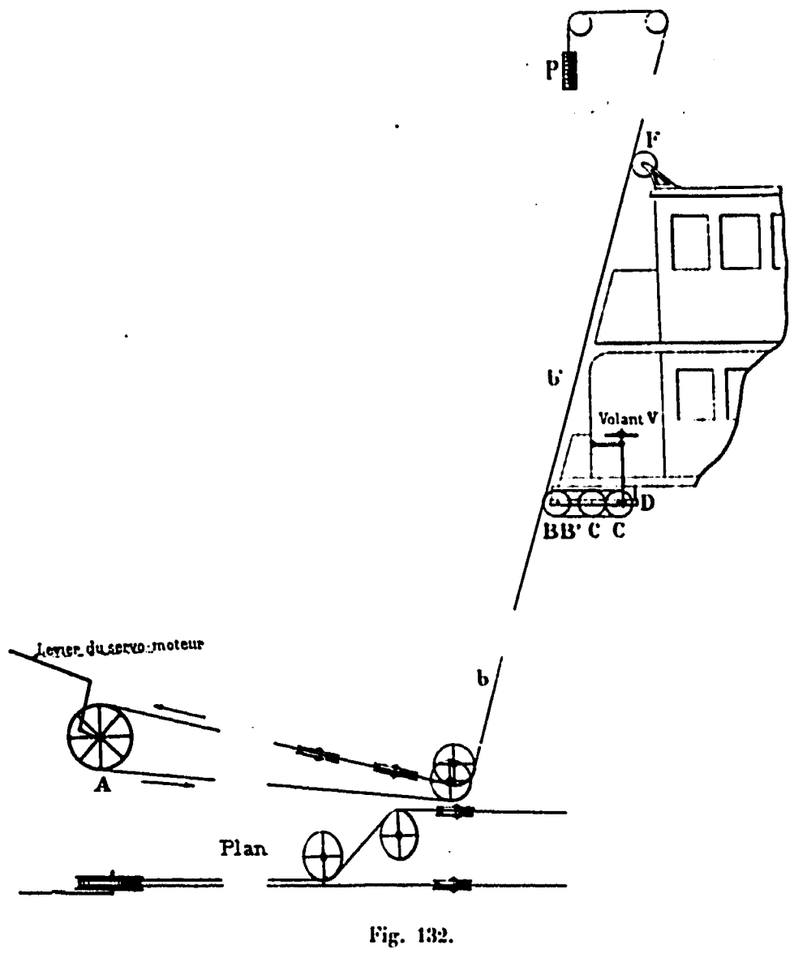


Fig. 132.

Chaque brin de câble passe d'abord sur une première poulie de renvoi B, puis sur une poulie C, dont l'axe est légèrement oblique sur la verticale. Il repasse ensuite sur une deuxième poulie de renvoi B', ayant le même axe que la première, et remonte au deuxième étage guidé par des poulies dont la première F est sur le toit de la cabine.

Les axes des poulies obliques C,C sont fixés sur deux crémaillères D,D, commandées par le même pignon E. Celui-ci engrène avec un petit pignon placé sur l'axe du volant de manœuvre V à la main du conducteur. Il obtient ainsi, suivant le sens de la rotation, une traction sur l'un ou l'autre brin du câble et, par conséquent, le mouvement du servo-moteur, correspondant à l'arrêt, la montée ou la descente.

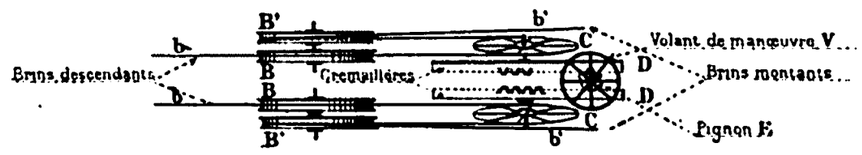


Fig. 133.

En somme, les poulies obliques de l'appareil de manœuvre sont douées de trois mouvements : le mouvement de la cabine, le mouvement de va-et-vient des crémaillères et un mouvement de rotation produit par le câble sans fin.

Le mouvement de va-et-vient n'a lieu que lorsque le conducteur agit sur le volant de manœuvre; les deux autres mouvements existent tant que la cabine est en mouvement.

Les détails de construction de cet appareil sont représentés dans la planche XXII, figures 12 et 13.

9° *Appareils de sûreté.* — Il est indispensable, avec ce système d'ascenseur, de se prémunir contre la rupture possible des câbles. A cet effet, des appareils de sûreté ont été placés sur le châssis des cabines et sur le chariot du contrepoids.

Nous nous occuperons d'abord de l'appareil de sûreté des cabines

a) *Appareil de sûreté des cabines.* — Nous nous servirons du schéma ci-contre, dans lequel nous n'avons représenté le système, qui est symétrique, que du côté droit seulement (fig. 134 à 137).

Les six câbles viennent s'attacher deux à deux sur trois flasques A, portant deux rainures en arc de cercle dont le fond, en marche normale, bute contre deux boulons, *b*, *b*, fixés au châssis de la cabine. Chaque flasque peut osciller autour de l'un ou l'autre de ces boulons, en déplaçant longitudinalement, au moyen d'un troisième boulon, *g* formant maneton, une tige de déclenchement T.

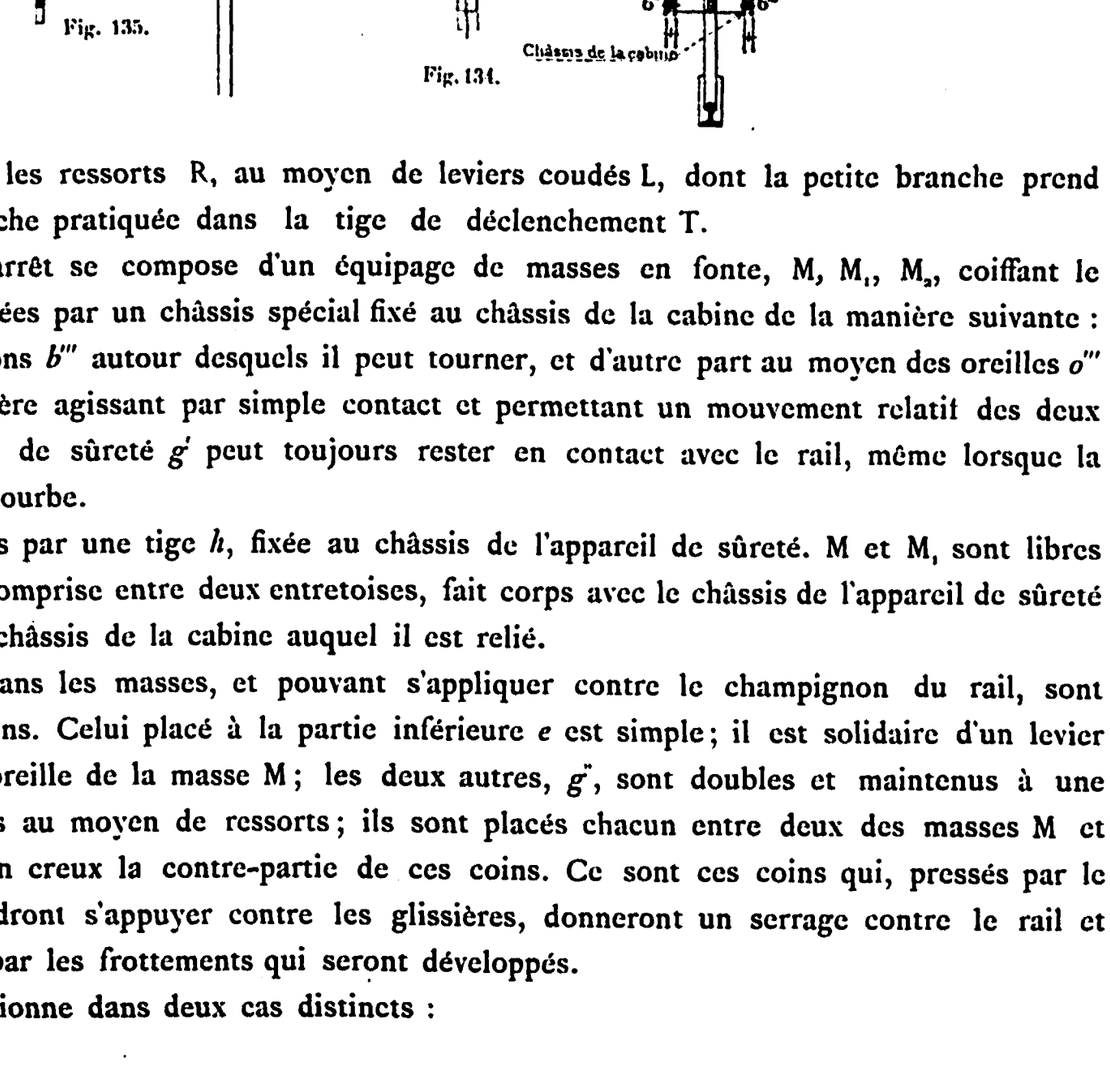


Fig. 134.

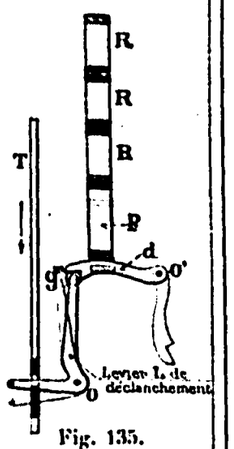


Fig. 135.

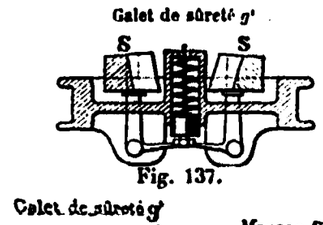


Fig. 137.

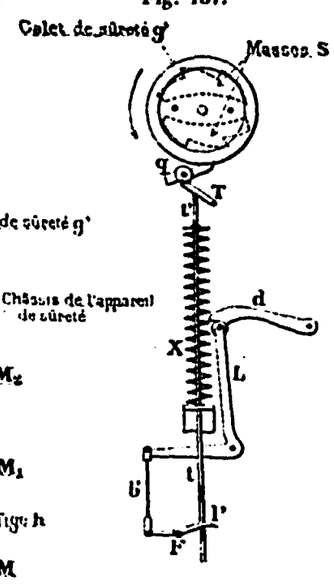


Fig. 136.

En temps normal, ces flasques sont placées comme l'indique la figure 135 (position noire) et les trois ressorts R en contact, prenant appui sur le châssis de la cabine, appuient sur une poutre P, maintenue en position par des corbeaux *d*, pouvant tourner autour de l'axe O' (fig. 135). Ces corbeaux *d* sont maintenus contre la poutre P, en bandant les ressorts R, au moyen de leviers coudés L, dont la petite branche prend appui sur le fond d'une encoche pratiquée dans la tige de déclenchement T.

Le système produisant l'arrêt se compose d'un équipage de masses en fonte, M, M_1, M_2, coiffant le champignon du rail, et supportées par un châssis spécial fixé au châssis de la cabine de la manière suivante : d'une part au moyen des boulons *b'''* autour desquels il peut tourner, et d'autre part au moyen des oreilles *o'''* formant une sorte de genouillère agissant par simple contact et permettant un mouvement relatif des deux châssis, grâce auquel le galet de sûreté *g'* peut toujours rester en contact avec le rail, même lorsque la cabine passe dans une partie courbe.

Les masses sont traversées par une tige *h*, fixée au châssis de l'appareil de sûreté. M et M_1 sont libres sur cette tige, tandis que M_2, comprise entre deux entretoises, fait corps avec le châssis de l'appareil de sûreté et reçoit toute l'impulsion du châssis de la cabine auquel il est relié.

Des glissières engagées dans les masses, et pouvant s'appliquer contre le champignon du rail, sont placées en regard de trois coins. Celui placé à la partie inférieure *e* est simple; il est solidaire d'un levier de sûreté *l* articulé sur une oreille de la masse M; les deux autres, *g''*, sont doubles et maintenus à une certaine distance des glissières au moyen de ressorts; ils sont placés chacun entre deux des masses M et M_1, M_1 et M_2, qui présentent en creux la contre-partie de ces coins. Ce sont ces coins qui, pressés par le déplacement des masses, viendront s'appuyer contre les glissières, donneront un serrage contre le rail et amèneront peu à peu l'arrêt par les frottements qui seront développés.

L'appareil de sûreté fonctionne dans deux cas distincts :

1°Rupture d'un câble ;

2° Vitesse de la cabine supérieure à 3 *m* par seconde.

1° *Rupture d'un câble.* — Supposons que le câble de traction *c'* vienne à se rompre (voir fig. 134),

l'action du câble conjugué *c* détermine la rotation de la flasque autour du boulon *b*, ce qui l'amène dans la position rouge. Cette rotation produit un abaissement du boulon *g* et, par conséquent, de la tige de déclenchement T. Le levier coudé L tourne autour de l'axe O, le galet *g'* échappe les corbeaux *d*, qui tombent.

Alors les ressorts R se détendent et poussent la poutre P et, par conséquent, les tiges *t* fixées à ses extrémités. La tige *t* de droite agit sur le levier de sûreté *l* qui, tournant autour de l'axe *o'* fixé sur la masse M, pousse vivement le coin *e* dans son encoche : il se produit, par l'intermédiaire de la glissière, un frottement sur le champignon du rail qui ralentit considérablement le mouvement de la masse M. La masse M_1 libre sur la tige *h*, continuant à descendre en vertu de l'inertie, il se produit un coincement du coin double *g'* à la fois dans les deux masses M et M_1. La masse M_2, reliée au châssis de l'appareil de sûreté qui reçoit l'impulsion de la cabine, arrive aussi se coincer sur l'extrémité supérieure du premier coin *g'*. L'ensemble des masses devient ainsi solidaire et les trois glissières portent sur le champignon du rail en déterminant un frottement des plus énergiques, qui produit progressivement l'arrêt du véhicule.

2° *Vitesse de la cabine supérieure à 3 m.* — Pour parer au cas, peu probable cependant, de la rupture simultanée de tous les câbles ou, d'une manière générale, d'un accroissement considérable dans la vitesse du véhicule, on a pris la disposition suivante (fig. 136).

Une tige *t* est maintenue abaissée par un levier T butant contre un taquet *q*. Dès que le levier T échappe le taquet, le ressort X, en se débandant, projette la tige *t* de bas en haut. Cette tige entraîne avec elle le loquet *l'* qui, par un renvoi de leviers, fait abaisser le bras inférieur du levier L, de sorte qu'il se produit le même effet que précédemment : les ressorts R sont rendus libres, et les freins entrent en action.

Le déclenchement du levier T est obtenu de la manière suivante (fig. 137) : au galet de sûreté *g'* du châssis de l'appareil, sont adaptés deux segments mobiles S, montés sur la grande branche de deux leviers coudés. Les petites branches de ceux-ci viennent comprimer un ressort réglé d'après la vitesse maxima que l'on s'est imposée.

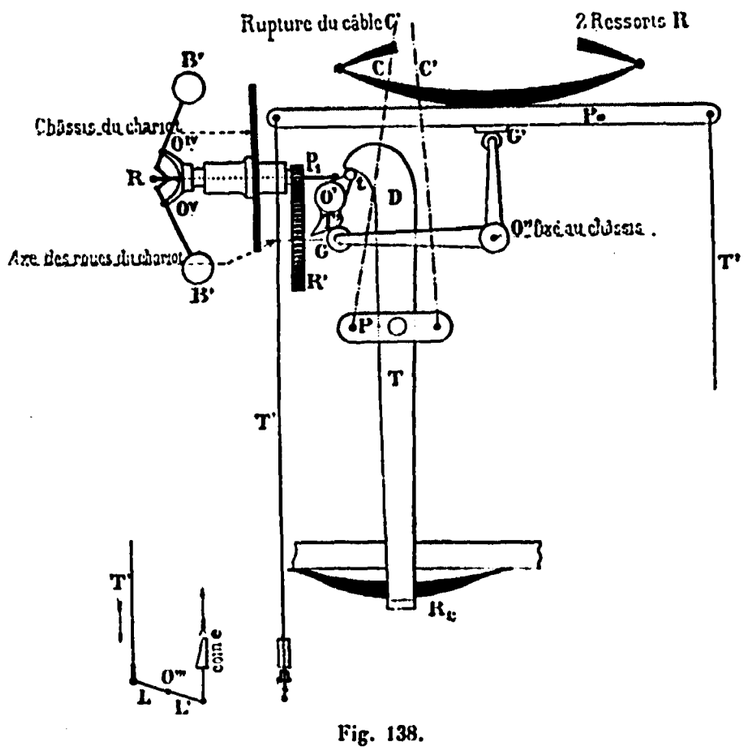


Fig. 138.

Dès que, à la descente, la vitesse de la cabine dépasse 3 *m* à la seconde, les segments (qui fonctionnent comme un régulateur à force centrifuge) s'écartent suffisamment de l'axe du galet pour que les entailles dont ils sont munis sur leur pourtour viennent soulever le taquet *q*, de sorte que le levier T se trouve déclenché.

Cet appareil est représenté dans la planche XXII^ter, fig. 3, 4, 5, 6 et 7 pour les ensembles, fig. 16, 17 et 18 pour le galet de sûreté ; chaque pièce est détaillée dans les figures qui accompagnent les ensembles. Nous nous contenterons de nous y reporter ainsi qu'aux explications données dans les textes.

b) *Appareil de sûreté du chariot contrepoids.* — L'arrêt du chariot contrepoids est obtenu, comme celui de la cabine, au moyen du serrage produit sur le champignon du rail à l'aide de coins doubles s'enfonçant dans des masses de fonte. Nous allons décrire simplement le système produisant le serrage du premier coin *e*, qui immobilise la masse M ; le reste du fonctionnement se passe de la même manière que pour la cabine (voir fig. 138).

Deux ressorts R_0, analogues aux précédents, prennent appui sur le châssis du chariot et appuient contre une poutre P_0 maintenue par le galet G' placé à l'extrémité d'un levier coudé oscillant autour d'un axe *o'* fixé au châssis. Le galet G' est maintenu en contact avec P_0, quand une virgule T' est en regard du galet G fixé à l'autre extrémité du levier coudé. La position de la virgule T' est assurée par le maneton *t* sur lequel appuie l'extrémité recourbée D d'une pièce T qui reçoit la traction des câbles par un palonnier P. Un ressort R_0, prenant appui sur une entretoise du châssis, assure le contact de l'extrémité D avec le maneton.

Si l'un des câbles, C' par exemple, vient à se rompre, le ressort R_0 rappelle vivement la tige T ; son extrémité D agit sur le maneton *t* et, par la rotation de la virgule T' autour de l'axe *o*, fait échapper le

galet G. Le galet G', par suite de la rotation du levier coudé autour de *o*, échappe aussi la poutre P. qui, poussée par les ressorts R, s'abaisse et donne un mouvement semblable aux deux tiges T'.

Ces tiges, par l'intermédiaire de leviers L, L' tournant autour de *o''*, amènent l'introduction des coins *e* dans les masses M, et le reste du fonctionnement s'achève comme nous l'avons déjà expliqué.

Vitesse supérieure à 3 m. — La rotation de la pièce *t* autour de l'axe *o'* est alors obtenue par l'action d'une tige R, que commande un régulateur à force centrifuge prenant son mouvement au moyen d'un pignon *p*, et d'une roue dentée R', sur l'axe des roues du chariot.

Cet appareil est représenté dans la planche XXII$_4$, fig. 1, 2 et 2bis, à laquelle nous nous reporterons.

§ 3. — Fabrication et résistance des câbles.

D'après ce qui a été dit précédemment, les données relatives aux trois séries de câbles employés sont résumées dans le tableau ci-dessous :

SPÉCIFICATION DES CABLES	DIAMÈTRE *mm.*	NUMÉROS DES FILS.	DIAMÈTRE DES FILS EN $\frac{1}{10}$ DE *mm.*	SECTION D'UN FIL *mm²*	NOMBRE DES FILS PAR CABLE.	SECTION PAR CABLE *mm².*	POIDS PAR MÈT. COURANT *kg.*	CHARGE MOYENNE DE RUPTURE *ky.*	ALLONGEMENT %	RÉSISTANCE PAR *mm²* *ky.*
Câbles moteurs de 380 *m* de longueur, composés de 8 torons de 37 fils n° 4, dont un en âme à triple enveloppe, avec âme principale en chanvre. Résistance minimum : 19.000 *kg*.	23	4	9	0,636	296	188.256	1,700	21.000 à 24.500	1,6 à 2,5	112 à 130
Câbles de contrepoids de 260 *m* de longueur, composés de 8 torons de 37 fils n° 6, câblés comme les précédents. Résistance minimum : 28.300 *kg*.	29	6	11	0,950	296	281.200	2,700	32.000 à 35.300	2,5 à 2	114 à 125
Câbles de manœuvre de 195 *m* et 160 *m* de longueur, composés de 8 torons de 12 fils n° 2 en acier clair. Catégorie n° IV avec âme en chanvre. Résistance minimum : 5.000 *kg*.	13	2	7	0,385	96	36.960	0,430	5.200 à 5.900	1,6 à 2	140 à 160

Tous ces câbles, fournis au prix de 1,55 *fr* le *kg*, proviennent de l'usine de Troncais (Allier) appartenant à la C^{ie} des Forges de Châtillon-Commentry.

Comme fabrication, leur câblage est celui dit en grelins ; la désignation du toron de 37 fils avec un fil en âme à triple enveloppe indique que chacun des huit torons est composé de 1 fil en âme, de 6 fils pour la 1re enveloppe, de 12 fils pour la 2^e, et de 18 fils pour la 3^e. Chacun des fils, d'un diamètre parfaitement régulier et sans trace de criques, a, au minimum, la longueur du câble, sans joints ni soudures.

Les fils sont en acier fondu clair à grande résistance. La charge de rupture imposée varie entre les minima et maxima suivants :

Pour le n° 6, 155 *kg* et 170 *kg* par *mm²* avec un allongement de 1 à 1,5 p. 100.

Pour le n° 4, de 160 *kg* et 175 *kg* par *mm²* avec les mêmes allongements.

De même pour le n° 2.

La flexibilité est mesurée par le nombre des pliages successifs à 180° que peut supporter le fil sur des mâchoires arrondies à 10 *mm* de rayon. Le nombre minimum de pliages est de 60 pour le n° 6, 75 pour le n° 4 et 80 pour le n° 2.

Enfin, tous les fils entrant dans un même câble doivent avoir les mêmes qualités de résistance, d'élasticité et de flexibilité, afin que la composition du câble soit aussi homogène que possible.

Tous les fils ont été essayés un à un dans les usines par M. Petitjean, contrôleur des Mines. Ils sont tous restés dans les limites ci-dessus, sauf le n° 2, qui a atteint 190 *kg*, avec un allongement de 1 p. 100. Pour tous les échantillons, le nombre de pliages a dépassé 80.

Les câbles, avant leur livraison, ont tous été essayés sur un bout de 2.00 *m*, détaché de l'une des extrémités.

La rupture ne se produit pas sur la totalité de la section ; mais successivement sur les fils, puis sur un certain nombre de torons, 2 à 4 en général, qui par suite du câblage se trouvaient fatigués plus que les autres.

La moyenne de la résistance des fils n° 6 étant de 160 *kg* par *mm²*, la résistance du câble rapportée à la

section totale n'est que de 120 *kg* par *mm²*. Celle du n° 4 étant de 165 *kg*, la résistance du câble correspondant n'est que de 125 *kg* par *mm²*. La différence de travail des fils inégalement tendus amène donc un commencement de rupture à une charge qui n'est que les 75 p. 100 de celle correspondant à la résistance de la somme des fils; c'est ce que l'on exprime en disant que le câblage fait perdre 25 p. 100 de la résistance.

La mise en service, qui a pour effet de resserrer les fils et d'établir un meilleur parallélisme entre eux, donne plus d'homogénéité aux câbles.

Ce fait est rendu manifeste par les expériences suivantes, que la C^ie^ P.-L.-M. a bien voulu très obligeamment charger M. Wanderheym, ingénieur du contrôle, de réaliser dans son laboratoire d'essais.

Les premiers essais (octobre 1890) ont été faits sur deux câbles de contrepoids jugés hors de service et présentant dans leur partie la plus fatiguée, sur une longueur de 0,25 *m*, correspondant approximativement à la longueur du pas de l'hélice de câblage, l'un 12 fils, l'autre 15 fils rompus. Ces deux câbles avaient, aux essais avant l'emploi, rompu sous une charge de 35.300 *kg*, soit 125,6 *kg* par *mm²*.

Le premier a rompu sous une charge de 34.710 *kg* et le second sous celle de 33.840 *kg*. La section nette du premier, qui n'avait plus que 284 fils, était de 269,8 *mm²* et l'effort total correspondant : 128,6 *kg*. Celle du second, qui n'avait plus que 281 fils, était de 266,9 *mm²* et l'effort total correspondant : 127,6 *kg*. Ces deux chiffres sont supérieurs à l'effort unitaire de 125,6 *kg* obtenu avec le câble neuf.

Les seconds essais (octobre 1893) ont été également faits sur un câble de contrepoids, hors de service, dont la partie la plus fatiguée avait, sur une longueur de 0,25 *m*, 17 fils rompus, et sur une longueur de 1,00 *m*, 41 fils.

Il avait donné aux essais à l'usine 34.266 *kg*, soit 121,8 *kg* par *mm²*. La rupture s'est produite à 33.000 *kg*.

La section nette des 279 fils restants est de 265 *mm²*, ce qui donne un effort unitaire de 128,3 par *mm²*, très supérieur au chiffre obtenu avec le câble neuf.

Ainsi, malgré la grande détérioration de ce câble, dont la section s'était réduite de 5,8 p. 100 sur une longueur de 0,25 *m*, et de 14 p. 100 sur 1,00 *m*, la résistance effective n'a diminué que de $\frac{1.266}{34.266} = 3,7$ p. 100.

L'usage en service a donc bien pour effet d'améliorer le misage, ce qui est rendu manifeste par le plus grand nombre de torons, qui, au lieu de se rompre successivement comme dans le câble neuf, se rompent simultanément : dans le dernier câble essayé notamment, les 8 torons se sont rompus à peu près en même temps.

En outre, quand les ruptures de fils isolés se produisent sur une longueur un peu grande, telle que 1.00 *m*, les frottements existant d'un fil à l'autre compensent les pertes de section, ainsi que cela a lieu dans une épissure.

Pour ces deux motifs, on peut donc, sans aucun inconvénient et sans diminuer sensiblement la sécurité, admettre, avant la mise hors de service du câble, la rupture d'un assez grand nombre de fils. Le nombre admis par le service de l'exploitation est 10 p. 100 sur la longueur de 0,25 *m* ; l'affaiblissement de résistance doit à peine atteindre 5 p. 100.

Quant à l'effort en service, les calculs qui seront donnés plus loin et dont les résultats sont d'accord avec ceux donnés par des expériences directes, qui seront ultérieurement relatées, établissent :

1° Pour les câbles de traction, un effort total maximum de 7.287 *kg* sur le brin courant et 8.577 *kg* sur le brin mort extrême du mouflage, quand la cabine monte en pleine charge ; soit pour chacun des câbles, au nombre de 4, le quart de l'effort, c'est-à-dire 1.822 *kg* sur le brin courant et 2.144 *kg* sur le brin mort extrême.

2° Pour les câbles de contrepoids, un effort total maximum de 6.286 *kg* sur le brin courant et de 5.660 sur le brin mort extrême du mouflage. Ces maximums se produisent, le premier près des poulies supérieures, quand la cabine pleine descendante est encore dans le haut de sa course, et le second au point fixe du mouflage, quand elle monte. L'effort pour chacun des deux câbles est de 3.143 *kg* sur le brin courant et 2.830 *kg* sur le brin mort extrême.

Ces chiffres sont très inférieurs aux charges de rupture de 22.000 *kg* environ pour le câble moteur et 33.000 *kg* pour le câble de contrepoids. Les coefficients de travail sont :

Pour les câbles de traction : 9,68 *kg* pour le brin courant et 11,39 *kg* pour le brin mort.

Pour les câbles de contrepoids : 10,14 *kg* sur le brin courant et 10,06 *kg* sur le brin mort.

Il s'ensuit que par l'effort direct les câbles moteurs ne travaillent qu'au 1/10e de leur résistance totale et les câbles de contrepoids qu'au 1/12e environ.

Mais ces efforts sont ceux qui se rapportent aux parties droites des câbles. Partout où ils passent sur des poulies, sur lesquelles ils sont obligés de s'incurver, la fatigue du fil élémentaire augmente notablement. Cette fatigue spéciale est donnée par la formule : $R = 20.000 \frac{d}{D}$, dans laquelle *d* est le diamètre du fil, D le diamètre de la poulie en *mm*, et 20.000 le module d'élasticité correspondant (1).

Pour les câbles de traction, le diamètre de la poulie de mouflage est de 1.524 *mm*, et le diamètre du fil 0,9 *mm* : $R_1 = \frac{18.000}{1.524} = 11,8$ *kg*.

Pour les câbles de contrepoids, dont le fil a un diamètre de 1,1 *mm*, le diamètre de la poulie mobile du mouflage est de 1.830 *mm* et celui de la poulie fixe 1.160 *mm*. On est ainsi conduit aux coefficients de 12 *kg* pour le brin courant, et 18,9 *kg* pour le brin mort.

En ajoutant ces chiffres aux précédents, sous la réserve de l'observation qui fait l'objet de la note ci-dessous, on trouve les coefficients totaux qui sont résumés dans le tableau suivant, lequel donne également les coefficients de sécurité.

DÉSIGNATION DES CABLES.		COEFFICIENTS DE TRAVAIL :			COEFFICIENTS DE :	
		TRACTION. *kg*	INCURVATION. *kg*	TOTAL. *kg*	RUPTURE. *kg*	SÉCURITÉ.
Câbles moteurs.....	Brin courant.....	9,68	11,80	21,48	125	1/6e
	Brin mort.....	11,39	11,80	23,19	125	1/5e
Câbles de contrepoids...	Brin courant.....	10,14	12,00	22,14	120	1/5e
	Brin mort	10,06	18,90	28,95	120	1/4

§ 4. — Marche de l'appareil.

La surface supérieure du piston, sur laquelle l'eau est introduite, correspond à celle du diamètre de 965 *mm*, diminuée de celles des 2 tiges de piston dont le diamètre est de 108 *mm*.

Surface de 965 *mm*	731.382 *mm*²
Surface de 108 *mm* = 9.160,88 × 2.....	18.322 *mm*²
Surface active.....	713.060 *mm*², soit 7.131 *cm*²

La course du piston est de 10,83 *m*.

Le volume d'eau dépensé pendant cette course descendante est de $10,83 \times 7.131 = 7.723$ *l*.

L'eau dans le réservoir du 2me étage est, pendant la course descendante du piston, à une cote moyenne de + 152 *m*. Le niveau du coude inférieur du tuyau de décharge se rendant au réservoir qui est voisin de l'appareil est à la cote + 32. La différence, qui est de 120 *m*, est la pression sous laquelle s'opère le fonctionnement de

(1) Nous appliquons cette formule pour nous conformer à l'usage. Mais nous devons ajouter qu'elle ne nous inspire que très peu de confiance, et que les fatigues maxima d'un câble incurvé doivent en réalité être très inférieures à celles qui résultent de l'emploi de cette formule.

Lors des montages des viaducs de Porto et de Garabit, dont les arcs, pendant la période de travail, étaient soutenus par des haubans en câbles d'acier, nous dûmes étudier l'effet du passage d'un câble sur les selles demi-rondes en fonte portées par l'arc, qui servaient d'appui.

Ces câbles de 43 *mm* de diamètre étaient formés par 152 fils de 2,4 *mm* de diamètre. Leurs essais donnaient une charge de rupture de 80 tonnes, correspondant à 124 *kg* par *mm*² de la section pleine du câble.

Nous avons donc interposé sur la longueur de câble de 10 *m* environ, qui servait aux essais, une pièce courbe en fonte ayant la forme d'une sorte de poulie hélicoïdale d'un diamètre de 0,50 *m*, dans laquelle passait le câble. L'application de la formule précédente donnait : $R = 20.000 \frac{2,4}{500} = 96$ *kg*. Quoique évidemment, comme toutes les formules de résistance, celle-ci ne s'applique exactement qu'en deçà de la limite d'élasticité, il est certain néanmoins qu'il résultait de son emploi un coefficient de travail très supérieur à cette limite dans la partie incurvée, laquelle aurait été, par le fait de l'enroulement, surchargée à l'excès et aurait rompu la première. Or, il n'en a pas été ainsi : la rupture s'est produite dans les parties droites. De plus, aucun effet nuisible ne s'est manifesté par l'emploi répété, dans ces conditions, des câbles servant au montage.

Ce fait peut être attribué à ce que la formule donne bien la fatigue pour la fibre extrême d'un fil, mais elle ne tient pas compte de ce que la position de cette fibre extrême varie constamment par suite du câblage et passe rapidement du côté opposé de l'axe neutre du fil, auquel cas l'effort d'incurvation lui-même vient soulager cette fibre d'autant qu'elle était fatiguée précédemment. Comme l'axe neutre, qui n'obéit qu'à l'effort de tension du câble, ne peut pas s'allonger sous l'effort d'incurvation, il s'établit, sur une courte longueur du câble, une compensation entre le travail de traction et celui de compression. Par suite, ces considérations permettent de penser que la résistance, au moins à l'état statique, d'un câble n'est pas sensiblement diminuée par son passage sur une partie courbe.

l'ascenseur. Comme l'appareil est constamment plein d'eau, cette pression reste constante dans les différents points de la course (abstraction faite de la section des tiges du piston dont l'effet à ce point de vue est tout à fait négligeable).

Cette pression de 12 *kg* est diminuée des pertes de charge, lesquelles varient beaucoup avec la vitesse. Elles peuvent être évaluées en moyenne à 10 *m* et correspondent à une diminution de pression de 1 *kg* par cm².

La pression effective est ainsi de 11 *kg*.

Le travail mécanique dépensé jusqu'à la sortie du cylindre est de $7.723 \times 12 \times 10 = 926.760$ *kgm*.

Le travail utile correspond à l'ascension des voyageurs de la cote moyenne + 36,50 à celle de + 152,23 comptée sur le centre de gravité de la charge des voyageurs, soit une hauteur de 115,73 *m*. Le poids des voyageurs étant de $50 \times 70 = 3.500$ *kg*, le travail utile est de : $3.500 \times 115,73 = 405.056$ *kgm*.

Le rendement est de $\frac{405.056}{926.760} = 0,44$, soit 44 p. 100.

Dans la réalité, le travail dépensé est un peu plus important, parce que le réservoir situé au pied des presses est lui-même placé à un niveau supérieur à celui dans lequel il a son écoulement et qui est situé dans la salle des machines d'où l'eau est aspirée par les pompes. Ce dernier réservoir est à la cote + 29, de sorte que la hauteur réelle de chute est de 123 *m*, donnant un travail moteur de $7,723 \times 12,3 \times 10 = 949.929$ *kgm*. et le rendement devient : $\frac{405.056}{949.929} = 0,426$, soit 43 p. 100.

§ 5. — Rendement.

Le rendement varie donc de 0 à 0,43 suivant le nombre des voyageurs transportés dans la cabine.

Nous devons ajouter que ce résultat n'a pas été atteint dans la pratique courante. Le nombre de personnes montées a été seulement de 45, y compris le conducteur et un homme dans chaque cabine, soit 42 voyageurs.

Quant à la vitesse réalisée, qui devait atteindre 400 pieds anglais par minute suivant le chemin de roulement, soit 2,00 *m* par seconde, elle est restée également au-dessous du chiffre prévu.

L'ascension du sol au deuxième étage s'est faite normalement en 112″. La hauteur d'ascension étant de 115,73 *m*, la vitesse est de $\frac{115,73}{112} = 1,04$ *m*, suivant la verticale.

La course suivant le chemin de roulement étant de 129,96 *m*, la vitesse réelle a été de $\frac{129,96}{112} = 1,17$ *m* au lieu de 2,00 *m*.

Mais cette diminution de presque moitié dans la vitesse n'influe que d'environ 30 p. 100 sur le nombre des voyages à l'heure, parce qu'une partie importante du temps d'un voyage est absorbée par la durée des entrées et des sorties des voyageurs. Cette durée était relativement longue en raison de la difficulté des dégagements : les voyageurs ne pouvaient entrer qu'après la sortie complète des premiers occupants. L'existence d'une porte unique est une des critiques que l'on peut faire à l'appareil.

Dans la pratique, la durée totale d'un voyage aller et retour du sol au deuxième, sans arrêt au premier, se décomposait comme suit :

Montée du sol au deuxième étage	112″
Arrêt au deuxième. Sortie et entrée des voyageurs à la descente	88″
Descente au sol	110″
Arrêt au sol. Sortie et rentrée des voyageurs pour la montée	80″
Total	402″

Soit environ 9 voyages à l'heure, correspondant à 378 voyageurs montés.

Quand on s'arrêtait au premier étage pour y échanger des voyageurs, le nombre des voyages était naturellement réduit et la durée d'un voyage complet, aller et retour, s'établissait comme suit :

2 courses à 120″	240″
3 changements de voyageurs à 90″	270″
Total	510″

Soit par heure $\frac{3.600}{510} = 7$ voyages.

Le nombre des voyageurs montés dans ces conditions est par heure de 300 au premier étage et de 300 du premier étage au deuxième.

Pendant la majeure partie du temps de l'Exposition, il était fait en outre un service spécial du 1er au 2me.

La durée d'un voyage comprenait :

2 courses à 60"	120"
2 arrêts à 88"	176"
Total	296"

Soit 12 voyages à l'heure et, avec 42 voyageurs, un nombre de 504 voyageurs montés à l'heure.

En résumé, le service tel qu'il était normalement organisé permettait l'ascension au 2me étage de :

Par le service direct au 2me	378 voyageurs à l'heure.
Par le service spécial du 1er au 2me	504 —
Total	882

Soit de 9.000 à 10.000 voyageurs par jour.

§ 6. — Équilibre des forces mises en jeu, abstraction faite des résistances passives.

Il est nécessaire tout d'abord de bien définir les forces mises en jeu. Elles ont en effet varié suivant les différentes périodes du fonctionnement.

Pour le contrepoids, notamment, M. Contamin a établi son Rapport à la Commission de surveillance de la Tour, en prenant un poids de 23.500 *kg*. Pendant la période de l'Exposition, le poids, d'après M. Ansaloni, ingénieur de l'exploitation, et d'après les ingénieurs américains, était de 25.000 *kg*. Mais depuis et après amélioration des divers organes et de leur mode de graissage, ce poids a été réduit à 20.660 *kg*, en chargeant par contre un peu plus, à l'aide de riblons rajoutés, le poids des masses motrices formées par les pistons et la partie mobile du moufle à 12 brins. C'est le poids qui a été maintenu depuis et qui a donné les meilleurs rendements en voyageurs montés. C'est d'après ce poids que nous avons établi les calculs définitifs qui, il faut le dire, ne nous ont jamais été, à notre grand regret, remis par les constructeurs de l'appareil ; ils nous eussent démontré que l'appareil ne pouvait, ni comme nombre de voyageurs, ni comme vitesse d'ascension, satisfaire complètement aux conditions du contrat de fourniture.

Nous résumons ces poids comme suit, après vérification :

1° *Cabine.* — Châssis, appareils de sûreté et mécanismes divers	5.800 *kg*	
Caisse supérieure	2.640	
Caisse inférieure	2.400	
Poids de la cabine vide	10.840	
Charge de 45 voyageurs à 70 *kg*	3.150	
Poids de la cabine pleine	13.990 *kg*, soit	14.000 *kg*
2° *Contrepoids.* — Chariot proprement dit	2.783 *kg*	
Partie mobile	695	
Appareil de sécurité	1.000	
Lest formé par des blocs de fonte moulée	16.182	
Poids du contrepoids	20.000 *kg*	
(Le poids des câbles enroulés sur le palan n'a pas d'influence sur la valeur des tensions.)		
3° *Masses mobiles de l'appareil moteur.* — Ossature du chariot mobile	3.090 *kg*	
Quatre galets de roulements et leurs essieux	605	
Boîtes à graisse et leurs supports	404	
Six poulies mobiles	4.068	
Accessoires de ces poulies, échafaudage de graissage et divers	873	
Riblons formant poids additionnel	5.080	15.080 *kg*
Piston principal	1.200	
Piston support des tiges	500	
Tiges de pistons, attaches sur le chariot et divers	2.800	4.500
Total		20.180 *kg*
(Le poids variable de câbles enroulés sur la partie mobile, évalué dans la position moyenne à 660 *kg*, n'intervient pas dans la recherche des tensions.)		
4° *Câbles.* — Poids des câbles moteurs 4×1,7 *kg* par mètre courant	6,80 *kg*	
Poids des câbles de contrepoids 2×2,7 *kg* par mètre courant	5,40	
Poids des câbles d'attache de la cabine par mètre courant	12,20 *kg*	
(Les poids des câbles en dehors des moufles sont les seuls qui interviennent dans la recherche des tensions.)		
5° *Surfaces de piston.* — La surface inférieure du piston est de	7.313 cm^2	
La surface nette supérieure est de	7.131	
6° *Pression de l'eau.* — Pression constante théorique par cm^2 (Voir p. 141)	12 *kg*	

C'est d'après ces poids que nous établirons l'équilibre, abstraction faite pour le moment des résistances passives, mais en tenant compte du poids des câbles, dont l'effet est loin d'être négligeable.

Nous adopterons les valeurs de 0,976 et 0,815 comme sinus des angles faits avec l'horizontale du chemin de roulement de la cabine en haut et en bas de sa course, angles qui sont de 77°30′ et 54°35′, et 0,877 pour la valeur correspondante relative à l'appareil moteur dont l'inclinaison est de 61°20′; enfin 0,815 pour celle relative au contrepoids dont le chemin est parallèle à la partie inférieure du chemin de la cabine.

a) *Cabine pleine à la montée.* — Nous ferons le calcul pour les deux cas où la cabine se trouve au rez-de-chaussée et au 2^{me} étage (voir fig. 140).

	CABINE AU REZ-DE-CHAUSSÉE.		CABINE AU 1er ÉTAGE.	
		kg.		*kg.*
Composante tangentielle de la cabine pleine	13.990 × 0,815	11.402	13.990 × 0,976	13.654
— du contrepoids	20.660 × 0,815	16.838	20.660 × 0,815	16.838
Tension du brin qui se détache du mouffle triple	$\frac{1}{3}$ × 16.838	5.613	$\frac{1}{3}$ 16.838	5.613
Aux poulies de renvoi du 2^{me} étage, cette tension s'est augmentée de celle due au poids de la longueur de câbles 1-2, qui est, développée	80 *m*		130 *m*	
La tension due à ces câbles de contrepoids est donc, sans tenir compte du frottement des câbles sur les galets de guidage, et des galets	80 × 5,4 × 0,976	422	130 × 5,4 × 0,976	685
La tension supérieure est par suite	5.613 + 422	6.035	5.613 + 685	6.298
A l'attache de la cabine, cette tension se diminue de celle due au poids de la longueur de câble 3-4 allant du 2^{me} étage à la cabine. Cette longueur est de	140 *m*		0 *m*	
La diminution de tension due à ces câbles de contrepoids est donc, abstraction faite du frottement sur les galets	140 × 5,4 × 0,976	738		0
Par suite, la traction exercée par le contrepoids sur la cabine est	6.035 — 738	5.297	6.298 — 0	6.298
La partie du poids de cabine non équilibré est	11.402 — 5.297	6.105	13.654 — 6.298	7.356
Au 2^{me} étage, ce poids se trouve augmenté de la tension due aux câbles moteurs, tension qui est	140 × 5,4 × 0,976	929		0
La tension sur les câbles moteurs au 2^{me} étage est donc	6.105 + 929	7.034	7.356 + 0	7.356
La tension sur le garant du mouffle moteur à l'entrée dans le mouffle s'obtient en diminuant la tension précédente de celle due aux câbles moteurs allant du 2^{me} étage au mouffle, les longueurs sont	114 *m*		125 *m*	
L'inclinaison supérieure étant en ce point de 75°50′, dont le sinus = 0,970, la tension due à ces câbles est	114 × 6,8 × 0,970	752	125 × 6,8 × 0,970	825
La tension du garant est donc	7.034 — 752	6.282	7.356 — 825	6.531
Sur le piston elle devient	6.282 × 12	**75.384**	6.531 × 12	**78.372**
Cet effort est contre-balancé par le poids des masses mobiles du moteur et par l'action de l'eau.				
La composante tangentielle des masses mobiles est	20.180 × 0,877	17.698	20.180 × 0,877	17.698
L'effort résistant est donc, sans résistances passives	75.384 — 17.698	**57.686**	78.372 — 17.698	**60.674**
La pression hydraulique théorique dont on dispose est	7.131 × 12	**85.572**	7.131 × 12	**85.572**
L'excès de la pression hydraulique sur l'effort résistant est	85.572 — 57.686	**27.886**	85.572 — 60.674	**24.898**

Cet excès est nécessaire pour vaincre les frottements et les pertes de charge. Nous verrons plus loin (p. 151) que la somme de ces deux résistances varie de 13.061 à 21,004 *kg* pour la vitesse de 1,00 *m* et de 17.031 à 24.974 *kg* pour la vitesse de 1,50 *m*. On peut donc déjà voir ici qu'il est possible de marcher sur toute la course à une vitesse supérieure à 1,00 *m*, mais inférieure à 1,50 *m*, puisqu'à cette vitesse et vers la fin du trajet, l'excès de pression hydraulique disponible, soit 24.898 *kg*, est inférieur à la somme des résistances passives et pertes de charge, soit 24.974 *kg*.

b) *Cabine vide à la descente.* — En second lieu, il est nécessaire d'examiner la condition d'équilibre pour la descente de la cabine vide dans le cas le plus défavorable, c'est-à-dire quand celle-ci est au bas de sa course.

Dans cette position, la composante tangentielle de la cabine est : 10.840 × 0,815 = 8.835 *kg*.

Quant au contrepoids, le brin qui se détache du mouffle triple a toujours une tension de 5.613 *kg*. Cette tension, en se transmettant aux poulies de renvoi supérieures, s'augmente de celle due au poids de la longueur de câble comprise entre ces poulies et le mouffle; son poids est de 80 × 5,4 = 432 *kg*. La tension qui en résulte est de 432 × 0,976 = 422 *kg*. La tension supérieure est donc de 5.613 + 422 = 6.035 *kg*.

A l'attache de la cabine, cette tension se diminue de celle due au poids de la longueur de câble allant des poulies de renvoi du 2^{me} étage à la cabine. Ce poids est de 140 × 5,4 = 756 *kg*, et la tension correspondante est de 756 × 0.976 = 738 *kg*. Par suite, la tension à l'attache de la cabine, provenant du contrepoids, est de : 6.035 — 738 = 5.297 *kg*. Elle équilibre le même poids de la cabine.

La partie du poids de la cabine non équilibrée est donc de 8.835 — 5.297 = 3.538 *kg*, qui est la tension du câble moteur en ce point.

Cette tension, pour se transmettre au 2^me^ étage, s'augmente de celle due au poids de la longueur des câbles moteurs et pesant 140×6,8=952 *kg*. La tension due au poids de ces câbles est donc : 952×0,976=929 *kg*, et celle au 2^me^ étage 3.538+929=4.467 *kg*.

C'est aussi la tension supérieure du câble qui se rend au mouffle moteur. Cette tension, en arrivant au mouffle, se diminue de celle due au poids du câble, lequel est de 114×6,8=775 *kg*. La tension due au poids de ces câbles est donc 775×0,970=752 *kg* et celle à l'entrée du mouffle 4.467—752=3.715.

La traction exercée par la cabine sera donc : 3.715×12=44.580 *kg*.

Or la composante tangentielle des masses mobiles est 17.698 *kg*. L'excès est donc 44.580—17.698= 26.882 *kg*.

Non seulement, il permet la descente de la cabine, mais il oblige, pour obtenir la vitesse normale, de réduire, par la manœuvre du distributeur, le mouvement de l'eau dans la conduite de communication du haut au bas du cylindre.

Nous donnons ci-après le calcul complet de l'appareil en tenant compte des résistances passives, ce qui est essentiel pour la détermination de la tension des câbles.

ÉTUDE DYNAMIQUE DE L'ASCENSEUR

§ 1. — Tensions exercées par le contrepoids sur la cabine.

Le contrepoids pèse 20.660 *kg* dont les composantes sont les suivantes :
Composante tangentielle :

$$X_0 = 20.660 \times 0{,}815 = 16.838.$$

Composante normale :

$$Y_0 = 20.660 \times 0{,}579 = 11.962.$$

Le diamètre D des galets de roulement est de 0,530 *m*. Celui des fusées *d* de 0 092 *m*.

Adoptons comme coefficient de frottement *f* de la fusée dans ses coussinets la valeur 0,07, et comme coefficient de roulement la valeur 0,003, lesquelles conviennent à des mécanismes soigneusement entretenus.

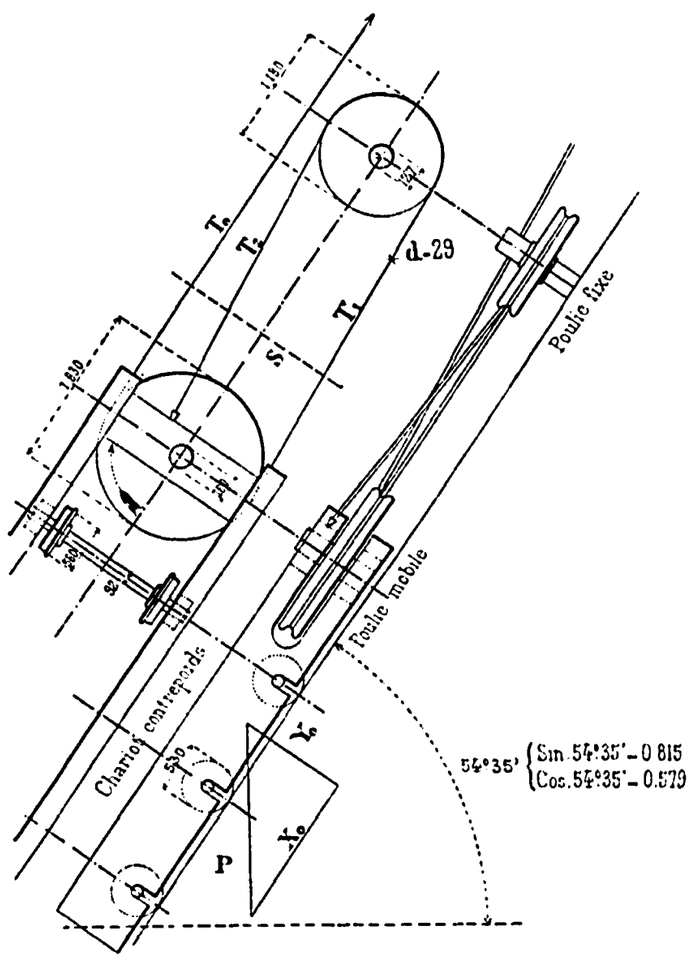


Fig. 139. — Plan et élévation du chariot contrepoids. (Schéma.)

La traction totale S exercée par le contrepoids sur les brins du mouflé est donnée par la composante X_0 augmentée ou diminuée des frottements.

a) *La cabine s'abaisse et le contrepoids monte :*

$$S = X_0 + Y_0\left(0{,}003 + \frac{d}{D}f\right) = X_0 + 0{,}015\,Y_0 = 17.017\,kg.$$

b) *La cabine s'élève et le contrepoids descend :*

$$S' = X_0 - 0{,}015\,Y_0 = 16.659\,kg.$$

1° Tensions des différents brins du mouflé près du contrepoids. — Les deux valeurs de la tension totale S et S' permettent de déterminer les tensions T_0, T_1, T_2 des brins du mouflé (Voir fig. 139).

a) *La cabine s'abaisse et le contrepoids monte.* — La tension t_1, *d'un seul câble* du brin situé du côté mort, est donnée en fonction de la tension t_0 du brin situé du côté courant, par la formule :

$$t_1 = t_0 - QP - It_0$$

dans laquelle QP représente les frottements des fusées et It_0 la raideur des câbles.

La valeur de Q est de : $Q = f\frac{d}{D} = 0{,}0061$

d, diamètre de la fusée de la poulie mobile = 100 *mm*.
D, diamètre de cette poulie = 1.830 *mm*.

P, force d'application de la poulie sur ses coussinets, est donné par la relation :

$$P = t_0 - t_1 + P_m$$

dans laquelle P_m est le poids propre de la poulie relatif à un câble du brin, soit $\frac{1}{2}640\,kg = 320\,kg$.

I est le coefficient qui tient compte de la raideur des câbles.
Portant la valeur de P dans la formule précédente, il vient :

$$t_1 = t_0\frac{1-(Q+I)}{1-Q} - P_m\frac{Q}{1-Q} \quad (1)$$

Calcul de I. — Désignons par I_1 la résistance absolue due à l'incurvation du câble sur la poulie, et par *t* la tension du câble produisant cette incurvation.
On a pour le coefficient I :

$$I = \frac{I_1}{t}.$$

La valeur de I_1 est donnée par la formule suivante déduite des expériences de M. Murgue, pour un câble en acier, après une lubrification complète, laquelle réduit sa raideur primitive de 40 p. 100 (*Annales des Ponts et Chaussées*, 1887, 2e semestre, et Mémoire de M. de Longraire à la Société des Ingénieurs civils, année 1889) :

$$I_1 = (2 + 0{,}002\,t)\frac{p}{D}$$

dans laquelle :

p désigne le poids du câble par mètre courant, soit 2,7 *kg* ;

D, le diamètre de l'incurvation, 1.830 *m* ;

t, la tension moyenne du câble, $\frac{17.017}{3\times 2} = 2.836\,kg$.

On trouve :

$$I_1 = 11{,}28 \qquad \text{et} \qquad I = \frac{11{,}28}{2.836} = 0{,}00396$$

d'où

$$Q + I = 0{,}0101 \qquad 1-(Q+I) = 0{,}9899 \qquad t_1 = t_0 \times 0{,}996 - 1{,}95$$

La valeur numérique de ce dernier terme est négligeable ; en laissant donc de côté le terme $P_m\frac{Q}{1-Q}$ de la formule (1), cette dernière se réduira dans la suite des calculs à :

$$t_1 = t_0\frac{1-(Q+I)}{1-Q}.$$

On aura de même comme valeur de t_2 en fonction de t_1 :

$$t_2 = t_1\frac{1-(Q+I)}{1-Q}$$

dans cette expression :

$$Q = 0{,}07\,\frac{127}{1.180} \doteq 0{,}0075 \qquad I = \frac{(2 + 0{,}002 \times 2.836)\frac{2{,}7}{1{,}18}}{2.836} = 0{,}0062.$$

On en déduit :

$$1-Q = 0{,}9925 \qquad Q+I = 0{,}0137 \qquad 1-(Q+I) = 0{,}9863$$

et $t_2 = 0{,}994\,t_1$.

Or nous avons : $\frac{S}{2} = \frac{17.017}{2} = t_0 + t_1 + t_2 = 2{,}986\,t_0$

d'où : $t_0 = 2.851 \qquad t_1 = 2.839 \qquad t_2 = 2.822$

et : $T_0 = 5.702 \qquad T_1 = 5.678 \qquad T_2 = 5.644$

b) *La cabine s'élève et le contrepoids descend :*

Dans ce cas on a :

$$t_1 = t_0 + QP + It_1 \qquad \text{et} \qquad P = t_1 + t_0 + P_m$$

d'où en négligeant P_m :

$$t_1 = t_0 \frac{1+Q}{1-(Q+I)}.$$

Avec une tension moyenne du câble de $\frac{16.659}{3\times 2} = 2.776$, les valeurs numériques sont :

$$Q = 0,07\ \frac{160}{1.830} = 0,0061 \qquad \text{et} \qquad I = \frac{(2+0,002\times 2776)\frac{2,7}{1,83}}{2.776} = 0,0040$$

$$1+Q = 1,0061 \qquad Q+I = 0,0102 \qquad 1-(Q+I) = 0,9898$$

$$t_1 = 1,016\, t_0.$$

On a de même :

$$t_2 = t_1 \frac{1+Q}{1-(Q+I)}$$

$$Q = 0,07\frac{127}{1.180} = 0,0075 \qquad I = \frac{(2+0,002\times 2.776)\frac{2,7}{1,18}}{2.776} = 0,0062$$

d'où : $1+Q = 1,0075 \qquad Q+I = 0,0137 \qquad 1-(Q+I) = 0,9863$

et : $$t_2 = 1,021\, t_1$$

Or nous avons : $$\frac{S'}{2} = \frac{16.659}{2} = t_0 + t_1 + t_2 = 3,053\, t_0$$

d'où : $t_0 = 2.728\,kg \qquad t_1 = 2.772\,kg \qquad t_2 = 2.830\,kg$

et : $T_0 = 5.456\,kg \qquad T_1 = 5.544\,kg \qquad T_2 = 5.660\,kg$

2° Traction exercée par les câbles de contrepoids sur la cabine.

a) *Ascension de la cabine.* — Considérons d'abord le cas où *la cabine commence au rez-de-chaussée son mouvement ascensionnel* (Voir fig. 140). La traction en (1) est $T_0 = 5.456\,kg$. En (2) elle s'accroit du poids des câbles entre (1) et (2). Cette longueur est en réalité de $80\,m$. Nous la prenons égale à $70\,m$ pour tenir compte de l'inclinaison du câble et de son frottement sur les galets de guidage. En (2), la tension est donc :

$$5.456 + 70\times 5,4 = 5.834\,kg$$

En (3) elle est $T'_0 = 2t'_0$, telle que l'on ait

$$\frac{5.834}{2} = 2.917 = t'_0 \frac{1+Q}{1-(Q+I)} = 1,016\, t'_0.$$

Le diamètre de la poulie étant de $1,372\,m$ et celui de la fusée $0,101\,m$, on a :

$$Q = 0,07\frac{101}{1,372} = 0,0051 \qquad I = \frac{(2\times 0,002\times 2.917)\frac{2,7}{1,37}}{2.917} = 0,0053$$

$$1+Q = 1,0051 \qquad Q+I = 0,0104 \qquad 1-(Q+I) = 0,9896$$

$$t'_0 = 2.871\,kg \qquad \text{et} \qquad T'_0 = 5.742\,kg.$$

En (4) la tension diminue de celle due au poids de la longueur de câble (3)-(4). Cette longueur est de $140\,m$. Nous la prenons égale à $130\,m$ pour les mêmes raisons que ci-dessus. En (4) la tension T''_0 est comprise entre :

$$T'_0 = 5.742 - 70\times 5,4 = 5.364\,kg$$

et $$T''_0 = 5.364 - 60\times 5,4 = 5.040\,kg$$

selon que l'on admet que les rouleaux-guides entre le rez-de-chaussée et le premier étage supportent ou non tout le poids des câbles sur ce parcours. Nous prendrons pour valeur de T''_0 la moyenne entre ces deux hypothèses : $T''_0 = 5.202\,kg$. Ceci revient à prendre la longueur (3)-(4) égale à $100\,m$.

Lorsque la cabine sera arrivée en haut de sa course (Voir fig. 140), ces tensions seront respectivement :

En (2) : $$5.456 + 70\times 5,4 + \frac{60}{2}\times 5,4 = 5.996\,kg.$$

En (3) : $$T'_0 = T''_0 = \frac{5.996}{1,016} = 5.901\,kg.$$

En admettant que la valeur numérique du coefficient $\frac{1+Q}{1-(Q+I)}$ soit restée sensiblement la même.

b) *Descente de la cabine :*

La cabine s'abaissant arrive au bas de sa course. Les tensions successives sont :

En (1) : $5.702\,kg$

En (2) : $5.702 + 70\times 5,4 = 6.080\,kg$

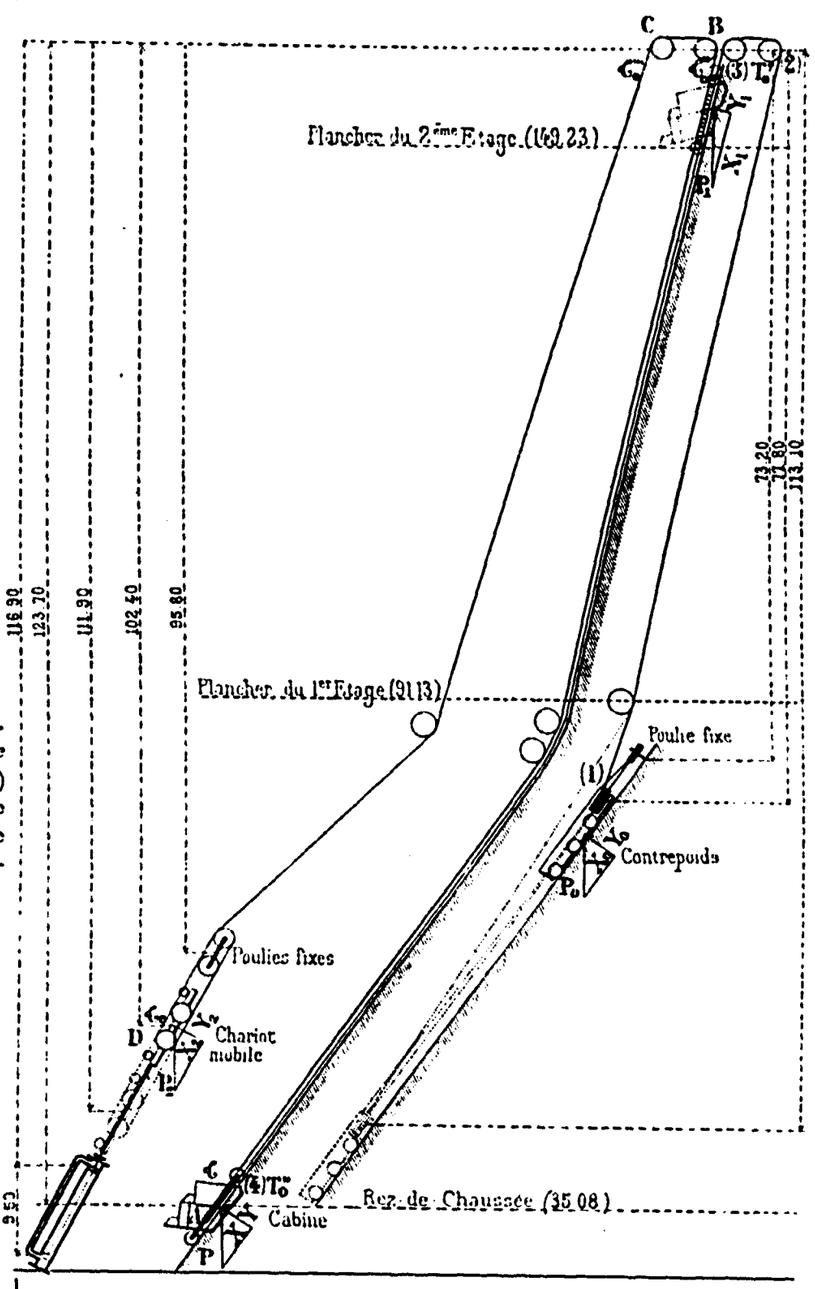


Fig. 140. — Diagramme de l'ensemble de l'ascenseur.

En (3) nous aurons une tension $T'_0 = 2t'_0$, telle que l'on ait :

$$\frac{6.080}{2} = 3.040 = t'_0 \frac{1-(Q+I)}{1-Q} = 0,993\, t'_0$$

$$Q = 0,0051 \qquad I = \frac{(2+0,002\times 3.040)\frac{2,7}{1,37}}{3.040} = 0,0052$$

$$T'_0 = 6.123\,kg$$

En (4) la tension sera, en se plaçant dans les mêmes conditions que plus haut :

$$T''_0 = 6.123 - 540 = 5.583\,kg$$

Lorsque la cabine s'abaissant part du haut de sa course, les tensions successives sont :

En (1) : 5.702

En (2) : $5.702 + 540 = 6.242\,kg$

En (3) : $\frac{6.242}{0,993} = T'_0 = T''_0 = 6.286\,kg$

§ 2. — Tensions dans le garant du moufle moteur.

La cabine et son truck pèsent	10.840 *kg*
45 voyageurs à 70 *kg* pèsent.....	3.150
Total.....	13.990 *kg*

La cabine est au rez-de-chaussée :

Composantes normales au chemin de roulement : Y	Cabine chargée.....	13.990×0,579 =	8.100 *kg*
	Cabine vide.....	10.840×0,579 =	6.276 *kg*
Composantes parallèles au chemin de roulement : X	Cabine chargée.....	13.990×0,815 =	11.402 *kg*
	Cabine vide.....	10.840×0,815 =	8.835 *kg*

La cabine est en haut de sa course au 2e étage :

Composantes normales au chemin de roulement : Y_1	Cabine chargée.....	13.990×0,216 =	3.022 *kg*
	Cabine vide.....	10.840×0,216 =	2.341 *kg*
Composantes parallèles au chemin de roulement : X_1	Cabine chargée.....	13.990×0,976 =	13.654 *kg*
	Cabine vide.....	10.840×0,976 =	10.580 *kg*

1° Efforts $\mathfrak{T}$ à l'attache de la cabine.

a) *Ascension de la cabine.* — Les galets de roulement de la cabine ont pour dimensions :

D, diamètre de roulement = 660 *mm*
d, diamètre de la fusée = 63 *mm*

L'effort $\mathfrak{T}$ à l'attache de la cabine a pour valeur :

$$\mathfrak{T} = X + Y\left(0{,}003 + \frac{63 \times 0{,}07}{660}\right) - T'_0 =$$

Cabine pleine....	11.480 — T'_0
Cabine vide.....	8.895 — T'_0

entre le rez-de-chaussée et le premier étage, et

$$\mathfrak{T} = X_1 + Y_1\left(0{,}003 + \frac{63}{660} \times 0{,}07\right) - T'_0 =$$

Cabine pleine....	13.683 — T'_0
Cabine vide.....	10.602 — T'_0

entre le 1er et le 2e étage.

Remplaçons T'_0 par ses valeurs correspondantes (paragr. a) 5202 et 5901.

On a :

Valeur de $\mathfrak{T}$ Cabine au rez-de-chaussée.	Cabine pleine.....	11.480 — 5.202 = 6.278 *kg*
	Cabine vide.....	8.895 — 5.202 = 3.693 *kg*
Valeur de $\mathfrak{T}$ Cabine au 2e étage.	Cabine pleine.....	13.683 — 5.901 = 7.782 *kg*
	Cabine vide.....	10.602 — 5.901 = 4.701 *kg*

b) *Descente de la cabine.* — L'effort $\mathfrak{T}$ a pour valeur :

$$\mathfrak{T} = X - Y\left(0{,}003 + \frac{63}{660} \times 0{,}07\right) - T''_0 =$$

Cabine pleine...	11.324 — T''_0
Cabine vide.....	8.775 — T''_0

entre le rez-de-chaussée et le 1er étage,

et $T = X_1 - Y_1\left(0{,}003 + \frac{63}{660} \times 0{,}07\right) - T''_0 =$

Cabine pleine...	13.635 — T''_0
Cabine vide.....	10.558 — T''_0

entre le 2e étage et le 1er, d'où (voir valeurs de T''_0 au paragr. *b*) :

Valeur de $\mathfrak{T}$ Cabine au rez-de-chaussée.	Cabine pleine.....	11.324 — 5.583 = 5.741 *kg*
	Cabine vide.....	8.775 — 5.583 = 3.192 *kg*
Valeur de $\mathfrak{T}$ Cabine au 2e étage.	Cabine pleine.....	13.635 — 6.286 = 7.349 *kg*
	Cabine vide.....	10.558 — 6.286 = 4.272 *kg*

2° Efforts $\mathfrak{T}''_0$ avant les poulies de renvoi du 2e étage. — Il faut tenir compte du poids de la longueur AB des câbles de la cabine, longueur réduite à 100 *m* pour les raisons vues plus haut. Le poids du mètre courant des quatre câbles moteurs est de 6,8 *kg*.

En ajoutant ce poids aux tensions précédentes, on trouve :

a) Dans le cas de l'*ascension de la cabine* :

Valeur de $\mathfrak{T}''_0$, Cabine au rez-de-chaussée.	Cabine pleine.....	6.278 + 100×6,8 = 6.958 *kg*
	Cabine vide.....	3.693 + 100×6,8 = 4.373 *kg*
Valeur de $\mathfrak{T}''_0$ Cabine au 2e étage.	Cabine pleine.....	7.782 + 0 = 7.782 *kg*
	Cabine vide.....	4.701 + 0 = 4.701 *kg*

b) Dans le cas de la *descente de la cabine* :

Valeur de $\mathfrak{T}''_0$ Cabine au rez-de-chaussée.	Cabine pleine.....	5.741 + 100×6,8 = 6.421 *kg*
	Cabine vide.....	3.192 + 100×6,8 = 3.872 *kg*
Valeur de $\mathfrak{T}''_0$ Cabine au 2e étage.	Cabine pleine.....	7.349 + 0 = 7.349 *kg*
	Cabine vide.....	4.272 + 0 = 4.272 *kg*

3° Efforts $\mathfrak{T}'''_0$ après les poulies de renvoi du 2e étage. — L'effort $\mathfrak{T}''_0$ s'augmente de la résistance au frottement des poulies de renvoi et de la résistance due à l'incurvation des câbles sur ces poulies.

Les dimensions de ces poulies sont :

D, diamètre d'incurvation = 1.524 *m*.
d, diamètre des fusées = 0,127 *m*.
f, coefficient de frottement des fusées = 0,07.

a) *Ascension de la cabine.* — En appelant t''_0 et t'''_0 les tensions qui se rapportent à un seul des quatre câbles du brin moteur, on a, comme précédemment, la relation :

$$t'''_0 = t''_0 \frac{1+Q}{1-(Q+I)}$$

dans laquelle : $Q = \frac{127}{1.524} \times 0{,}07 = 0{,}0058.$

Valeur de I *pour la cabine pleine :*

$$I = \frac{(2 + 0{,}002 \times t)\frac{1{,}7}{1.524}}{t}.$$

Prenons pour t la moyenne des deux tensions 6.958 et 7.782 divisée par 4, soit 1.842 *kg*.

On trouve :

$$I = 0{,}0034 \qquad Q + I = 0{,}0092 \qquad 1 - (Q+I) = 0{,}9908$$
$$t''_0 = 1{,}015\, t'_0.$$

Valeur de I *pour la cabine vide.* — Prenons pour valeur de t la moyenne des tensions 4.373 et 4.701 divisée par 4, soit 1.134 *kg*.

On trouve :

$$I = 0{,}0042 \qquad Q + I = 0{,}0100 \qquad 1 - (Q+I) = 0{,}99$$
$$t'''_0 = 1{,}016\, t''_0.$$

Les différentes valeurs de la tension $\mathfrak{T}''_0$ lorsque la cabine monte sont donc :

Valeur de $\mathfrak{T}'''_0$ Cabine au rez-de-chaussée.	Cabine pleine.....	6.958×1,015 = 7.062 *kg*
	Cabine vide.....	4.363×1,016 = 4.443 *kg*
Valeur de $\mathfrak{T}'''_0$ Cabine au 2e étage.	Cabine pleine.....	7.782×1,015 = 7.899 *kg*
	Cabine vide.....	4.701×1,016 = 4.776 *kg*

b) *Descente de la cabine.* — On a ici :

$$t'''_0 = t'_0 \frac{1-(Q+I)}{1-Q}.$$
$$Q = 0{,}0058.$$

Valeur de I *pour la cabine pleine :*

$$I = \frac{(2 + 0{,}002\, t)\frac{1{,}7}{15{,}24}}{t}$$

Prenons pour valeur de t la moyenne des tensions 6.421 et 7.349 divisée par 4, soit 1.721 *kg*.

On trouve :

$$I = 0{,}0035 \qquad Q + I = 0{,}0093 \qquad 1 - (Q+I) = 0{,}9907$$

et

$$t'''_0 = 0{,}996\, t'_0.$$

Valeur de I *pour la cabine vide.* — Prenons pour valeur de t la moyenne entre 3.872 et 4.272 divisée par 4, soit 1.018.

On trouve :

$$I = 0{,}0044 \qquad Q + I = 0{,}0102 \qquad 1 - (Q+I) = 0{,}9898$$

et

$$t'''_0 = 0{,}995\, t''_0.$$

Les différentes valeurs de la tension $\mathfrak{T}'''_0$ lorsque la cabine descend sont donc :

Valeur de $\mathfrak{T}'''_0$ Cabine au rez-de-chaussée.	Cabine pleine.....	6.421×0,996 = 6.395 *kg*
	Cabine vide.....	3.872×0,995 = 3.853 *kg*
Valeur de $\mathfrak{T}'''_0$ Cabine au 2e étage.	Cabine pleine.....	7.349×0,996 = 7.320 *kg*
	Cabine vide.....	4.272×0,995 = 4.255 *kg*

4° Tensions $\mathfrak{T}_e$ à l'origine du moufle. — Il faut retrancher des tensions précédentes le poids de la longueur de câble CD, longueur que nous réduisons à 90 *m*, soit :

$$90 \times 6{,}8 = 612\ kg.$$

Les différentes valeurs de la tension $\mathfrak{T}_e$ sont donc :

a) *Ascension de la cabine :*

Valeur de $\mathfrak{T}_e$ Cabine au rez-de-chaussée.	Cabine pleine.....	$7.062 - 612 = 6.450\ kg$
	Cabine vide.....	$4.443 - 612 = 3.831\ kg$
Valeur de $\mathfrak{T}_e$ Cabine au 2e étage.	Cabine pleine.....	$7.899 - 612 = 7.287\ kg$
	Cabine vide.....	$4.776 - 612 = 4.164\ kg$

b) *Descente de la cabine :*

Valeur de $\mathfrak{T}_e$ Cabine au rez-de-chaussée.	Cabine pleine.....	$6.395 - 612 = 5.783\ kg$
	Cabine vide.....	$3.853 - 612 = 3.241\ kg$
Valeur de $\mathfrak{T}_e$ Cabine au 2e étage.	Cabine pleine.....	$7.320 - 612 = 6.708\ kg$
	Cabine vide.	$4.255 - 612 = 3.643\ kg$

5° Tensions T_{11} du brin mort du moufle et détermination des tractions totales F sur le palan. — Soit t_e la tension sur un câble à l'entrée du mouflage et t_{11} la tension sur un câble du brin mort.

D, diamètre d'incurvation des poulies du moufle = 1,524 *m*.
d, diamètre des fusées = 0,127 *m*.

Nous considérons toujours les deux cas de l'ascension et de la descente de la cabine.

a) *Ascension de la cabine.* — On a pour valeur de la tension t_{11} :

$$t_{11} = \left[\frac{1+Q}{1-(Q+I)}\right]^{11} t_e$$

$$\left(\text{en négligeant toujours le terme : } P_m \frac{Q}{1-(Q+I)}\right)$$

dans laquelle : $$Q = f\frac{d}{D} = 0{,}07\,\frac{127}{1.524} = 0{,}0058.$$

Valeur de I *pour la cabine pleine.* — On a :

$$I = \frac{(2 + 0{,}002\,t)\,\frac{1{,}7}{1{,}524}}{t}$$

Nous prendrons pour *t* le quart de la plus grande tension T_e à la montée, soit :

$$\frac{7.287}{4} = 1.822\ kg.$$

On trouve :

$$I = 0{,}0034 \qquad Q + I = 0{,}0092 \qquad 1 - (Q+I) = 0{,}9908$$

et $$t_{11} = (1{,}015)^{11}\, t_e = 1{,}177.\, t_e$$

d'où

$$T_{11} = 1{,}177.\, T_e$$

La somme des tractions sur les câbles du moufle sera celle des termes d'une progression géométrique, soit :

$$F = \mathfrak{T}_e\left[\frac{\overline{1{,}015}^{12} - 1}{1{,}015 - 1}\right] = \frac{1{,}196 - 1}{0{,}015}\,\mathfrak{T}_e = 13{,}06.\,\mathfrak{T}_e.$$

Valeur de I *pour la cabine vide.* — Nous prendrons pour *t* le quart de la tension 4.164, soit : 1.041 *kg*.

On a alors :

$$I = 0{,}0017 \qquad Q + I = 0{,}0105 \qquad 1 - (Q+I) = 0{,}9895$$

$$t_{11} = (1{,}016)^{11}\, t_e = 1{,}198.\, t_e$$

d'où :

$$T_{11} = 1{,}198.\, \mathfrak{T}_e$$

La somme des tractions sur les câbles du moufle sera :

$$F = \mathfrak{T}_e\left[\frac{\overline{1.016}^{12} - 1}{1.016 - 1}\right] = \mathfrak{T}_e\,\frac{1.21 - 1}{0{,}016} = 13{,}125.\,\mathfrak{T}_e$$

Les tensions T_{11} et F sont donc :

Valeurs de T_{11} et de F Cabine au rez-de-chaussée.	Cabine chargée.	Valeur de T_{11}	$6.450 \times 1{,}177 = 7.592\ kg$
		Valeur de F	$6.450 \times 13{,}06 = 84.237\ kg$
	Cabine vide....	Valeur de T_{11}	$3.831 \times 1{,}198 = 4.589\ kg$
		Valeur de F	$3.831 \times 13{,}125 = 50.282\ kg$
Valeurs de T_{11} et de F Cabine au 2e étage.	Cabine chargée.	Valeur de T_{11}	$7.287 \times 1{,}177 = 8.577\ kg$
		Valeur de F	$7.287 \times 13{,}00 = 95.168\ kg$
	Cabine vide....	Valeur de T_{11}	$4.164 \times 1{,}198 = 4.988\ kg$
		Valeur de F	$4.164 \times 13{,}125 = 54.652\ kg$

b) *Descente de la cabine.* — On a pour valeur de la tension t_{11} :

$$t_{11} = \left[\frac{1-(Q+I)}{1-Q}\right]^{11} t_e.$$

La valeur de Q est toujours : $Q = 0{,}0058$.

Valeur de I *pour la cabine pleine.* — On a :

$$I = \frac{(2 + 0{,}002\,t)\,\frac{1{,}7}{1{,}524}}{t}$$

Prenons pour *t* le quart de la tension 6.708, soit : 1.677 *kg*.

On trouve :

$$I = 0{,}0035 \qquad Q + I = 0{,}0093 \qquad 1 - (Q+I) = 0{,}9907$$

et $$t_{11} = (0{,}996)^{11}\, t_e = 0{,}957.\, t_e$$

d'où :

$$T_{11} = 0{,}957.\, \mathfrak{T}_e$$

La somme F des tractions sur les câbles du moufle sera :

$$F = \left[\frac{1 - \overline{0{,}996}^{12}}{1 - 0{,}996}\right].\mathfrak{T}_e = \frac{1 - 0{,}953}{0{,}004} = 11{,}75\,\mathfrak{T}_e.$$

Valeur de I *pour la cabine vide.* — Nous prendrons pour *t* le quart de la tension 3.643 *kg*, soit 911 *kg*.

On a :

$$I = 0{,}0046 \qquad Q + I = 0{,}0104 \qquad 1 - (Q+I) = 0{,}9896$$

d'où : $$t_{11} = (0{,}995)^{11}\, t_e = 0{,}946.\, t_e$$

$$T_{11} = 0{,}946.\, T_e$$

La somme des tractions sur les câbles du moufle sera :

$$F = \mathfrak{T}_e\left[\frac{1 - \overline{0{,}995}^{12}}{1 - 0{,}995}\right] = \frac{1 - 0{,}942}{0{,}005}\,\mathfrak{T}_e = 11{,}60\,\mathfrak{T}_e$$

On peut donc faire, pour le cas de la descente, le tableau des valeurs de T_{11} et de F, qui est le suivant :

Valeurs de T_{11} et de F Cabine au rez-de-chaussée.	Cabine chargée.	Valeur de T_{11}	$5.783 \times 0{,}957 = 5.534\ kg$
		Valeur de F	$5.783 \times 11{,}75 = 67.950\ kg$
	Cabine vide....	Valeur de T_{11}	$3.241 \times 0{,}946 = 3.066\ kg$
		Valeur de F	$3.241 \times 11{,}60 = 37.596\ kg$
Valeurs de T_{11} et de F Cabine au 2e étage.	Cabine chargée.	Valeur de T_{11}	$6.708 \times 0{,}957 = 6.419\ kg$
		Valeur de F	$6.708 \times 11{,}75 = 78.819\ kg$
	Cabine vide....	Valeur de T_{11}	$3.643 \times 0{,}946 = 3.446\ kg$
		Valeur de F	$3.643 \times 11{,}60 = 42.258\ kg$

Le tableau suivant résume ces différents efforts :

EFFORTS.	MOUVEMENT ASCENSIONNEL DE LA CABINE.				MOUVEMENT DE DESCENTE DE LA CABINE.			
	AU HAUT DE LA COURSE.		AU BAS DE LA COURSE.		AU HAUT DE LA COURSE.		AU BAS DE LA COURSE.	
	Cabine pleine.	Cabine vide.	Cabine pleine.	Cabine vide.	Cabine pleine.	Cabine vide.	Cabine pleine.	Cabine vide.
	kg	*kg*	*kg*	*kg*	*kg*	*kg*	*kg*	*kg*
Traction dans le garant.....	7.287	4.164	6.450	3.831	6.708	3.643	5.783	3.241
Traction dans le dormant.....	8.577	4.988	7.592	4.589	6.419	3.446	5.534	3.066
Traction totale sur le moufle..	95.168	54.652	84.237	50.282	78.819	42.258	67.950	37.596

Les efforts maximums correspondent à la cabine pleine en haut de sa course et sont, pour le câble, de 8.577 *kg* vers le point fixe du moufle moteur, et sur le palonnier d'attache des tiges de piston au chariot mobile, 95.168 *kg*.

§ 3. — Effort moteur.

L'effort moteur pour l'élévation de la charge comprend la composante tangentielle du poids des masses mobiles et l'action de l'eau sur le piston, diminuée des frottements du piston et des tiges dans leurs garnitures.

1° **Action des masses mobiles.** — Le poids des masses mobiles se décompose ainsi :

Chariot mobile.....	10.000 *kg*	20.180 *kg*
Riblons.....	5.680	
Pistons et leurs tiges.....	4.500	
Câbles enroulés, en moyenne.....	660	
Total.....	20.840 *kg*	

Le chemin de roulement du chariot est incliné de 61°20' sur l'horizontale. Les éléments de cet angle sont :

$$\sin 61°20' = 0{,}877 \qquad \cos 61°20' = 0{,}479$$

La composante tangentielle a pour valeur, sans tenir compte des câbles qui n'interviennent pas :

$$X_1 = 20.180 \times 0{,}877 = 17.698\ kg.$$

La composante normale du chariot mobile, des riblons et des câbles est seule utile; elle a pour valeur :

$$Y_1 = 16.340 \times 0{,}479 = 7.827\ kg.$$

Pour l'évaluation des *frottements des garnitures du piston et des tiges*, il faut considérer :

1° Le frottement dû au poids propre du piston qui est de 1.200 *kg*.

Sa composante normale est :

$$1.200 \times 0{,}479 = 576\ kg.$$

Si 0,10 est le coefficient de frottement, nous aurons comme valeur absolue du frottement :

$$576 \times 0{,}10 = 58\ kg.$$

2° Le frottement dû aux garnitures du piston et de ses tiges.

Pour cela, nous assimilerons les garnitures du piston et des tiges, qui transmettent la pression aux parois du cylindre suivant une loi indéterminée, à une série de cuirs emboutis équivalents, ayant 0,020 *m* de hauteur, et transmettant l'action hydraulique avec une intensité égale, suivant toute leur hauteur. Cela posé, le frottement absolu des différentes garnitures sera donc fourni par l'expression générale :

$$apf\Sigma 2\pi r.$$

$a = 0{,}02\ m$, hauteur des garnitures en pression.

$p = 10\ kg$, pression moyenne unitaire pour la montée du véhicule, et 15 *kg* pour la descente.

$f = 0{,}10$, coefficient de frottement.

$\Sigma 2\pi r$, somme des périmètres des différentes garnitures soumises à l'action hydraulique.

Cette somme est la suivante :

Piston.....	$2r = 96{,}5\ cm$	$2\pi r = 303{,}2\ cm$	
Tiges.....	$2r = 10{,}8\ cm$	$4\pi r = 67{,}8$	
Tige du piston support.....	$2r = 7{,}6\ cm$	$2\pi r = 23{,}88$	
Total.....			394,88 *cm*

Par suite, on a :

Cas de la montée : $apf\Sigma 2\pi r = 790\ kg$ (1).

Cas de la descente : $apf\Sigma 2\pi r = 1.185\ kg$.

Le frottement total sera donc :

Cas de la montée : $790 + 58 = 848\ kg$.

Cas de la descente : $1.185 + 58 = 1.243\ kg$.

Finalement l'action des masses mobiles du moteur sera dans le *cas de la montée de la cabine :*

$$S = X_1 + Y_1\left(0{,}003 + 0{,}07\,\frac{80}{508}\right) - 848$$

$d = 0{,}080\ m$, diamètre de l'axe des galets.

$D = 0{,}508\ m$, diamètre des galets.

$f = 0{,}07\ m$, coefficient de frottement des axes sur leurs coussinets.

On trouve :

$$S = 17.698 - 7.827 \times 0{,}014 - 840 = 16.741\ kg.$$

et dans le *cas de la descente de la cabine :*

$$S' = X_1 - Y_1\left(0{,}003 + f\frac{d}{D}\right) + 1.243$$

$$S' = 17.698 + 7.827 \times 0{,}014 + 1.243 = 18.050\ kg.$$

2° **Action de l'eau.**

a) *Ascension de la cabine.* — Au moment où la cabine pleine arrive au 2° étage, il faut que les organes qui agissent sur le mouflé produisent un effort de 95.168 *kg*.

(1) La formule d'Eytelwein pour les frottements dans les garnitures est $F = 4\,\frac{Dp}{1.000}$, D étant le diamètre et p la pression par mètre carré, on trouve pour $p = 100.000\ kg$:

$$F = 4(0{,}965 + 2 \times 0{,}108 + 0{,}070)100 = 4 \times 1{,}251 \times 100 = 503\ kg$$

et pour $p = 150.000$:

F = ... 754 *kg*

Les parties mobiles du mouflage, par leur poids, contribuent à cette traction pour 10.741 *kg*. L'eau n'a donc plus à produire sur le piston qu'un effort de :

$$P = 95.168 - 16.741 = 78.427\ kg.$$

Au rez-de-chaussée, la valeur de P pour la cabine pleine sera de :

$$P = 84.237 - 16.741 = 67.496\ kg.$$

La surface active de la face supérieure du piston a pour valeur 7.131 cm^2 et la hauteur d'eau correspondant à la pression est, en dehors des pertes de charge, de 120 *m*.

La pression totale sur le piston est de :

$$7.131 \times 12 = 85.572\ kg.$$

Cette pression est très supérieure aux efforts résistants précédemment trouvés qui sont de 78.427 et 67.496, et elle assure les déplacements de la cabine sur tout le parcours.

Mais, en réalité, il y a lieu de tenir compte des pertes de charge, dans la conduite d'alimentation et dans le distributeur. Ce calcul fait l'objet du tableau suivant. On suppose le distributeur complètement ouvert, et la cabine animée de 3 vitesses, savoir : 1,00 *m*, 1,50 *m* et 2 *m*.

Ascension de la cabine. — Distributeur ouvert.

	VITESSES DE LA CABINE : V_1	1,00 *m*	1,50 *m*	2,00 *m*
Piston :				
	Vitesses correspondantes : $V_2 = \frac{1}{12}V_1$.....	0,083 *m*	0,125 *m*	0,166 *m*
	Face supérieure, surface active : $\Omega = 0{,}7131\ m^2$.			
	Face inférieure, surface active : $\Omega_1 = 0{,}7313\ m^2$.			
	Débit relatif à la surface supérieure du piston.....	0,059 m^3	0,089 m^3	0,118 m^3
Conduite d'alimentation.	Longueur totale : $L = 152\ m$.			
	Diamètre intérieur : $D = 0{,}25\ m$.			
	Section : $\omega = 0{,}049\ m^2$.			
	Débit relatif à la conduite : $Q = \Omega V_2$.....	0,059 m^3	0,089 m^3	0,118 m^3
	Vitesse de passage de l'eau : $V = \frac{Q}{\omega}$.....	1,20 *m*	1,81 *m*	2,40 *m*
	Perte de charge par mètre courant (formule de Prony) due aux frottements : $J = (0{,}0000173\,V + 0{,}000348\,V^2)\frac{4}{D}$.	0,00835 *m*	0,01856 *m*	0,03275 *m*
	Perte de charge due aux frottements pour la longueur totale : $h = JL$.....	1,27 *m*	2,82 *m*	4,01 *m*
	Perte de charge due au passage de l'eau du réservoir dans la conduite : $0{,}49\frac{v^2}{2g}$. ...	0,035 *m*	0,083 *m*	0,144 *m*
	Perte de charge due au passage de l'eau de la conduite dans le cylindre $\frac{(V-V_2)^2}{2g}$ ...	0,070 *m*	0,145 *m*	0,255 *m*
	Perte de charge totale dans la conduite...	1,375 *m*	3,048 *m*	4,409 *m*
	Pressions correspondantes en *kg* par cm^2.	0,137 *kg*	0,305 *kg*	0,441 *kg*
Distributeur :				
	Section maximum de passage de l'eau dans la grille : 224 trous de 0,009 *m* de diamètre, soit : 0,0142 *m*.			
	Débit relatif à la face inférieure du piston : $\Omega_1 V_2$.....	0,061 m^3	0,091 m^3	0,122 m^3
	Vitesse de passage de l'eau dans le distributeur : $V = \frac{\Omega_1 \times V_2}{0{,}55 \times 0{,}0142}$	7,81 *m*	11,65 *m*	15,61 *m*
	(Coefficient de contraction = 0,55)			
	Charges correspondantes aux vitesses V : $h = \frac{V^2}{2g}$	3,11 *m*	6,91 *m*	13,00 *m*
	Pression correspondante en *kg* par cm^2.....	0,311 *kg*	0,691 *kg*	1,300 *kg*
	Pertes de charge totales (conduite et distributeur).....	0,448 *kg*	0,996 *kg*	1,741 *kg*

On voit que la perte de charge provenant du distributeur détermine une contre-pression sur la face inférieure du piston, qui a pour aire : 7.313 cm^2 et qui varie de 0,311 *kg* à 1,300 *kg* suivant les vitesses.

En sorte que, si la cabine est animée des trois vitesses citées plus haut, les pressions effectives, lorsque le véhicule plein arrive au 2° étage, sont, en tenant compte

pour l'entrée de la perte de charge dans les conduites, et pour la sortie de la perte de charge à travers la grille :

Vitesse de 1,00 *m* :

$$(12{,}00 - 0{,}137)\,7.131 - 0{,}311 \times 7.313 = 82.305\ kg.$$

Vitesse de 1,50 *m* :

$$(12{,}00 - 0{,}305)\,7.131 - 0{,}691 \times 7.313 = 78.315\ kg.$$

Vitesse de 2,00 *m* :

$$(12{,}00 - 0{,}441)\,7.131 - 1{,}300 \times 7.313 = 72.927\ kg.$$

Or, on a vu que les efforts que l'eau a à vaincre lorsque la cabine est au 2e étage et au rez-de-chaussée, sont respectivement 78.427 *kg* et 67.496 *kg*.

On voit donc que la marche de l'appareil est assurée pour des vitesses ne dépassant pas 1,50 *m*, mais qu'elle ne l'est pas pour la vitesse de 2,00 *m* prévue au contrat.

C'est ce que l'expérience a exactement confirmé avec les 30 voyageurs prévus, dont le nombre a dû être réduit à 15.

b) *Descente de la cabine.* — C'est le véhicule qui, dans ce cas, est l'appareil moteur. Il faut qu'étant vide et au rez-de-chaussée, il puisse faire remonter l'appareil moteur sur son chemin de roulement.

Or, on a vu que, dans ce cas, l'effort de traction que produit la cabine sur le mouflé est de 37.596 *kg*. L'effort à vaincre est de 19.765 *kg*. Il y a donc une grande marge pour le fonctionnement et on doit, même par la manœuvre du distributeur, étrangler les sections pour créer une contre-pression formant frein à la descente.

Il est facile, d'après les calculs qui précèdent, d'évaluer en *kg* le total des résistances passives de l'appareil.

§ 4. — Résumé des résistances passives pendant la montée de la cabine pleine.

	CABINE AU REZ-DE-CHAUSSÉE.	CABINE AU 2e ÉTAGE.
1° Contrepoids:		
Perte provenant du roulement du chariot..... 1/3 (16.838 — 16.659)	60 *kg*	60 *kg*
— du mouflé à trois brins..... 1/3 (16.659 — 16.638)	97	97
— du frottement du câble sur ses galets (Voir p. 144 et 147).	122 — 70 × 5,4 = 44	685 — 100 × 5,4 = 145
— des poulies de renvoi du 2e étage.....	5.834 — 5.742 = 92	5.996 — 5.901 = 95
	293	397
Gain provenant du frottement du câble de contrepoids du côté de la cabine..	738 — 540 = 198	0
Reste.....	95	397
Sur le piston moteur, ce reste devient.....	95 × 12 = 1.140	397 × 12 = 4.764
2° Cabine et moteur:		
Perte due au roulement de la cabine.....	11.480 — 11.402 = 78	13.683 — 13.654 = 29
— aux poulies de renvoi du 2e étage.....	7.062 — 6.958 = 104	7.899 — 7.782 = 117
— au frottement des câbles moteurs sur les galets du côté de la presse (Voir p. 144 et 149).....	752 — 612 = 140	825 — 612 = 213
	322	359
Gain dû au frottement des câbles du côté de la cabine (Voir p. 144 et 148)...	929 — 680 = 249	0
Reste.....	73	359
Sur le piston moteur, ce reste devient.....	73 × 12 = 876	359 × 12 = 4.308
Perte due au mouflé moteur.....	81.237 — (6.450 × 12) = 6.837	95.108 — (7.287 × 12) = 7.724
— au roulement du chariot mobile et aux garnitures du cylindre...	957	957
Total des frottements comptés sur le piston.....	9.810	17.753
3° Pertes de charges.		
Pour la vitesse de 1,00 *m* :		
Perte de charge dans la conduite.....	7.131 × 0,137 = 997	7.131 × 0,137 = 977
— dans le distributeur pour la sortie.....	7.313 × 0,311 = 2.274	7.313 × 0,311 = 2.274
Total.....	3.251 *kg*	3.251 *kg*
Pour la vitesse de 1,50 *m* :		
Perte de charge dans la conduite.....	7.131 × 0,305 = 2.175	7.131 × 0,305 = 2.175
— dans le distributeur pour la sortie.....	7.313 × 0,691 = 5.046	7.313 × 0,691 = 5.046
Total.....	7.221 *kg*	7.221 *kg*
On a donc comme total des résistances passives:		
Pour la vitesse de 1 *m*.....	9.810 + 3.251 = 13.061 *kg*	17.753 + 3.251 = 21.004 *kg*
Pour la vitesse de 1,50 *m*.....	9.810 + 7.221 = 17.031	17.753 + 7.221 = 24.974

En nombres ronds, le total des résistances passives de l'appareil varie de 13.000 *kg* à 21.000 *kg* pour la vitesse de 1,00 *m* et de 17.000 *kg* à 25.000 *kg* pour la vitesse de 1,50 *m*.

§ 5. — Expériences dynamiques et manométriques.

Afin de nous renseigner exactement sur ce qui se passe au sujet des efforts, des résistances passives et des pressions hydrauliques, nous avons effectué diverses expériences sur l'ascenseur du pilier Nord.

On a fait les essais de la cabine, d'abord très surchargée, puis portant sa charge normale, enfin vide et ne portant comme charge que le poids d'un seul conducteur.

La première charge a été prise telle, après essais successifs, qu'elle permettait, en ouvrant en plein

l'introduction d'eau, l'ascension sur la partie droite de la course inférieure, tout en l'arrêtant aux environs du 1er étage. En effet, avec cette charge, qui était de 4.025 *kg*, la cabine s'arrêtait à 3,50 *m* au-dessus du 1er étage, le distributeur restant complètement ouvert pour la montée.

La deuxième, qui était de 3.140 *kg*, correspond à la charge maxima de 45 voyageurs.

Enfin la troisième correspond à la charge du conducteur, lorsque la cabine vide effectue son parcours.

Sur le cylindre moteur étaient disposés deux manomètres, l'un dans le bas, et l'autre dans le haut, donnant la pression hydraulique, pour chaque position de la cabine.

Les pressions observées ont été celles contenues dans les deux tableaux suivants. Un de ces tableaux est établi pour la montée, l'autre pour la descente. Les pressions qui y figurent sont les pressions moyennes observées, pendant la majeure partie de la course, indépendamment des variations accidentelles, produites par les manœuvres rapides du distributeur, à la mise en marche et à l'arrêt.

MONTÉE DU SOL AU PREMIER ÉTAGE.

N° de l'expérience.	Charge de la cabine. kg	Pressions. Haut du cylindre. Arrêt au sol. kg	Haut du cylindre. Du sol au 1er. kg	Haut du cylindre. Arrêt au 1er. kg	Bas du cylindre. Arrêt au sol. kg	Bas du cylindre. Du sol au 1er. kg	Bas du cylindre. Arrêt au 1er. kg
1	4.025	11	11	11 Arrêt à 3.50m au-dessus du 1er étage.	0	0	0
3	3.140	11	9,5	11	5	1,7	0
5	75	11	8,5	11	7,4	4,5	7

MONTÉE DU PREMIER ÉTAGE AU DEUXIÈME.

N° de l'expérience.	Charge de la cabine. kg	Pressions. Haut du cylindre. Arrêt au 1er. kg	Haut du cylindre. Du 1er au 2e. kg	Haut du cylindre. Arrêt au 2e kg	Bas du cylindre. Arrêt au 1er. kg	Bas du cylindre. Du 2e au 1er. kg	Bas du cylindre. Arrêt au 2e. kg
1	4.025	»	»	»	»	»	»
3	3.140	11	10,5	11	0	0,2	0
5	75	11	9,2	11	7	3,5	7

DESCENTE DU DEUXIÈME ÉTAGE AU PREMIER.

N° de l'expérience.	Charge de la cabine kg	Pressions. Haut du cylindre. Arrêt au 2e. kg	Haut du cylindre. Du 2e au 1er. kg	Haut du cylindre. Arrêt au 1er. kg	Bas du cylindre. Arrêt au 2e. kg	Bas du cylindre. Du 2e au 1er. kg	Bas du cylindre. Arrêt au 1er. kg
2	4.025	»	»	»	»	»	»
4	3.140	11	17	11	0	9,8	3,7
6	75	11	11	11	7	10,5	7,5

DESCENTE DU PREMIER ÉTAGE AU SOL.

N° de l'expérience.	Charge de la cabine. kg	Pressions. Haut du cylindre. Arrêt au 1er. kg	Haut du cylindre. Du 1er au sol. kg	Haut du cylindre. Arrêt au sol. kg	Bas du cylindre. Arrêt au 1er. kg	Bas du cylindre. Du 1er au sol. kg	Bas du cylindre. Arrêt au sol. kg
2	4.025	11	17	11	0	10	3,4
4	3.140	11	15,5	11	3,7	10	4
6	75	11	12,5	11	7,5	11	8

Nous pouvons, à propos des chiffres inscrits aux tableaux qui précèdent, faire quelques remarques intéressantes.

Avec la cabine surchargée, la montée (Expér. 1) se fait au départ, pendant la marche et à l'arrêt au 1er étage, sous une pression constante, laquelle est la pression théorique pour le haut du cylindre, soit 11 *kg*, et est nulle pour le bas. Les pertes de charge n'influent ni sur l'entrée, ni sur la sortie. A la descente (Expér. 2), la pression théorique au départ de 11 *kg* s'accroît très notablement et monte jusqu'au chiffre de 17 *kg*. En effet, le dessus et le dessous du cylindre sont en communication entre eux et avec la conduite, par suite de la non-étanchéité de la bague en bronze qui obture l'ouverture. C'est donc au sein de l'eau sous pression que l'eau qui remplit la partie supérieure du cylindre est refoulée dans le bas. La contre-pression est de 10 *kg* pour le bas du cylindre, de sorte qu'en moyenne la différence de pression entre le haut et le bas du cylindre est de 7 *kg*. C'est sous cette pression que le piston entraîné par la descente de la cabine effectue sa montée au sein de l'eau ayant sa pression normale, diminuée des pertes de charge.

Avec la cabine pleine et sa charge normale de 3.140 *kg* (Expér. 3), la pression à l'arrêt avant le commencement et après la fin de la course est celle normale, soit 11 *kg*. Pendant la marche, elle varie à la montée de 9,5 *kg* pour le 1er étage, à 10,5 *kg* pour le 2me étage, avec une perte de charge de 1,5 *kg* à 0,5 *kg* par suite de la plus grande ouverture donnée au distributeur au fur et à mesure de la montée. Les contre-pressions, très faibles au début, deviennent nulles à la fin de la course.

Pour la descente (Expér. 4), on trouve les pressions de 17 *kg* du 2me étage au 1er et de 15,5 *kg* du 1er au sol avec une contre-pression de 10 *kg*. La descente s'effectue sous une pression de 7 à 5,5 *kg*.

Enfin, quand la cabine est vide et ne porte que son conducteur, la pression à la montée varie de 8,5 *kg*

à 9,2 *kg* et les contre-pressions de 4,5 *kg* à 3,5, soit une pression effective de 4 à 5,7 *kg*. La descente s'effectue sous une pression en haut du cylindre de 14 à 12,5 *kg* et une contre-pression en bas de 10,5 et 11 *kg*, c'est-à-dire sous une pression effective de 3,5 à 1,5 *kg*.

Les variations de ces pressions sont rationnelles, et on pourrait établir sur ces données d'utiles rapprochements ; nous nous contenterons d'en déduire par le calcul quelques résultats seulement.

§ 6. — Examen spécial de l'expérience n° 1.

L'expérience la plus intéressante à examiner est la première, c'est-à-dire celle où la cabine s'arrête d'elle-même en un point de son parcours, en complet équilibre et sous la pleine pression de l'eau, parce qu'elle élimine toutes les pertes de charge et ne laisse subsister que les frottements du mécanisme.

La cabine ainsi chargée de 4.025 *kg*, étant à l'arrêt au sol, le manomètre du haut indique 11 *kg* et celui du bas 0. La cabine démarre lentement et au bout de quelques instants sa vitesse devient uniforme et de 1 *m* environ. L'indication des manomètres n'a pas varié. Celui du haut accuse toujours 11 *kg* et celui du bas 0. Le distributeur du cylindre était complètement ouvert, c'est-à-dire que l'eau avait pour son introduction dans le cylindre sa plus grande section de passage. La cabine arrivant au 1er étage, sa vitesse diminue, et elle s'arrête à 3,50 *m* au-dessus du plancher de cet étage. Les manomètres se maintiennent toujours aux mêmes points et le distributeur du cylindre reste ouvert en plein pour la montée.

On a donc à ce moment équilibre absolu entre la pression hydraulique et les forces qui agissent sur les tiges du piston.

Établissons cet équilibre pour la position de 1,50 *m* au-dessus du 1er étage, afin de tenir compte de l'impulsion qu'elle possédait :

La cabine vide pèse	10.840 *kg*
La charge est de	4.025
Total	14.865 *kg*

L'inclinaison du chemin de roulement au point indiqué ci-dessus est de 68°10′ dont le sinus est 0,928. La composante tangentielle de la cabine est donc 14.865×0.928 = 13.795 *kg*.

Pour le contrepoids, on a vu § 6 que le brin qui se détache du mouflle triple a une tension de 5.613 *kg*.

Cette tension, en se transmettant aux poulies de renvoi supérieures, s'augmente de celle due au poids de la longueur de câble comprise entre ces poulies et le mouflle; son poids est de 106 *m*×5,4 = 572 *kg*. La tension qui en résulte est de 572×0,976 = 558 *kg*.

La tension supérieure est donc de 5.613 + 558 = 6.171 *kg*.

A l'attache de la cabine, cette tension se diminue de celle due au poids du câble allant des poulies de renvoi du 2me étage à la cabine. Ce poids est de 63×5,4 = 340 *kg* et la tension correspondante de 340×0.976 = 332 *kg*.

Par suite, la tension à l'attache de la cabine provenant du contrepoids est de 6.171—332 = 5.839 *kg*.

Elle équilibre le même poids de la cabine.

La partie du poids de la cabine non équilibrée est donc de 13.795—5.839 = 7.956 *kg*.

Cette tension, pour se transmettre au 2me étage, s'augmente de celle due au poids des câbles moteurs et qui est : 63×6,8 = 428 *kg*. La tension correspondante est donc : 408×0,976 = 418 *kg*.

Et celle au 2me étage : 7.956 + 418 = 8.374.

C'est aussi la tension supérieure du câble qui se rend au mouflle moteur. Cette tension, en arrivant au mouflle, se diminue de celle due au poids du câble se rendant à l'appareil moteur et qui est 120×6,8 = 816 *kg*.

La tension correspondante : 816×0,970 = 791 *kg*.

Et celle à l'entrée du mouflle : 8374—791 = 7.583 *kg*.

La traction totale sur le mouflle sera donc : 7.583×12 = 90.996 *kg*.

Or la composante tangentielle des masses mobiles (voir § 6) est 17.698 *kg*. L'action de l'eau devrait donc être de 90.996—17.698 = 73.298 *kg*.

La pression effective unitaire sur le piston est, d'après l'observation manométrique, de 11 *kg*.

Il faut y ajouter 0,5 *kg* pour tenir compte du fait que le piston est descendu dans le cylindre, et qu'une colonne d'eau d'environ 5,00 *m* est venue s'ajouter à la pression observée. La pression effective totale est donc de $7.131 \times 11,5 = 82.006$ *kg*.

Et l'excès de la pression hydraulique : $82.006 - 73.298 = 8.708$ *kg*.

Il représente donc, pour la charge et la position de la cabine, la somme des résistances passives. Les pertes de charge n'y figurent pas, puisqu'il n'y a pas mouvement de l'eau; de même, la force pour vaincre l'inertie n'y est pas contenue, puisque toute la pression disponible agit et que la cabine ne peut plus monter.

Comme conclusion, dans l'expérience n° 1, l'eau agissant à pleine pression et donnant 82.000 *kg* d'effort hydraulique, le frottement est de 8.708 *kg*.

Dans notre calcul (voir § 3), la pression agissant également en plein, c'est-à-dire en ne tenant compte d'aucune perte de charge, l'effort total moyen pour une pression moyenne entre 12 *kg* et 10,95 *kg* sur le piston est également de $7.131 \times 11,5 = 82.000$ *kg*. Les frottements s'élèvent (voir § 4) à 8.538 *kg* pour la cabine au rez-de-chaussée et à 9.392 *kg* pour la cabine au deuxième étage, soit en moyenne à 8.965 *kg*, qui doit être mis en comparaison avec le chiffre de 8.708 *kg* donné plus haut.

La variation du poids de la cabine n'ayant qu'une très faible influence sur les frottements, dans le cas d'une même pression hydraulique, on peut considérer qu'il y a concordance entre les chiffres de l'expérience et ceux du calcul.

On pourrait établir des calculs de comparaison analogues pour les autres expériences, mais cela nous entraînerait plus loin qu'il n'est nécessaire.

CHAPITRE III

ASCENSEURS A PISTONS ARTICULÉS

Système Roux, Combaluzier et Lepape.

Deux ascenseurs de ce système, représentés dans les Pl. XXIII et XXIII[bis], sont installés dans les piliers Est et Ouest de la Tour, pour monter les voyageurs du sol au 1[er] étage. Ils ont été étudiés par M. Guyenet, ingénieur, d'après le principe du brevet de MM. Roux, Combaluzier et Lepape. Les pièces principales ont été exécutées par MM. Carion et Delmotte, d'Anzin.

§ 1. — Principe de l'appareil.

Le système est basé sur le principe suivant : Si l'on constitue une chaîne au moyen de bielles articulées entre elles et si on l'oblige à se déplacer dans l'intérieur d'une gaine rigide, cette chaîne sera susceptible de travailler soit à la traction, soit à la compression, et elle pourra fonctionner à la façon d'un piston unique par l'intermédiaire duquel se produira le mouvement de la cabine. Celle-ci d'ailleurs restera, en tous les points de sa course, soutenue par un appui susceptible de s'opposer à sa chute, comme cela se produit dans les ascenseurs hydrauliques du système Édoux. De plus, ce piston articulé peut se déplacer suivant un chemin courbe, ce qui le différencie du système précédent.

Le chemin de roulement sur lequel se déplace la cabine est semblable à celui qui a été décrit pour l'ascenseur Otis. De chaque côté de ce chemin est installée la chaîne des pistons articulés sous forme de chaîne sans fin, qui engrène à la partie inférieure avec une roue motrice à empreintes R (voir schéma, fig. 141, p. 156) et passe sur une poulie de renvoi lisse R', placée au-dessus du 1[er] étage.

Le brin inférieur de chacune des deux chaînes est fixé à la cabine, laquelle est portée par des galets roulant sur une file de rails placés sur les poutres du chemin de roulement.

Chacun des circuits est enfermé dans une gaine continue qui entoure la roue motrice et la poulie de renvoi. Dans la portion correspondante à la course de la cabine, les deux parties de cette gaine sont juxtaposées (voir Pl. XXIII, fig. 14).

L'attache de la cabine se fait au moyen d'une traverse en fer P_1, faisant partie du circuit (voir fig. 141). Pour lui livrer passage pendant la marche de la cabine, la gaine inférieure est ouverte latéralement. Les pistons courants P sont formés de barres de 1 *m* de longueur, articulées entre elles à leurs extrémités. Chacune de ces articulations porte deux galets de 140 *mm* de diamètre, se déplaçant chacun entre deux rails fixés à la gaine, de sorte que la gaine rectangulaire renferme quatre rails placés près des angles, deux à la partie inférieure et deux à la partie supérieure (voir aussi fig. 5, 6 et 14 de la Pl. XXIII).

Dans chacun de ces circuits sont intercalés deux pistons tendeurs P_3 (fig. 141) servant à augmenter ou diminuer sa tension, et des pistons-contrepoids P_2, destinés à équilibrer en partie le poids de la cage (fig. 7, 8, 9 et 10, Pl. XXIII).

Chacun est actionné par un moteur hydraulique absolument indépendant, qui se compose d'un cylindre hydraulique à simple effet C*y* dans lequel se meut un piston plongeur P*l*, portant à son extrémité deux poulies de mouflage, sur chacune desquelles passe une chaîne de Galle, C*h*. Ces chaînes, fixées à l'une de leurs extrémités A*t*, actionnent, après avoir passé sur les poulies de mouflage, des pignons P*i* montés sur l'arbre portant la poulie motrice de la chaîne des pistons articulés.

Pour la montée, on fait communiquer les cylindres avec l'eau sous pression; les pistons, poussés en avant, entraînent les chaînes de Galle qui font tourner les arbres moteurs. Pour la descente, on fait communiquer les

cylindres avec l'évacuation ; le poids de la cage qui n'est pas complètement équilibré fait, par l'intermédiaire des pistons articulés, tourner les roues motrices et rentrer les plongeurs dans le cylindre (voir diagrammes, fig. 1 et 2, Pl. XXIII).

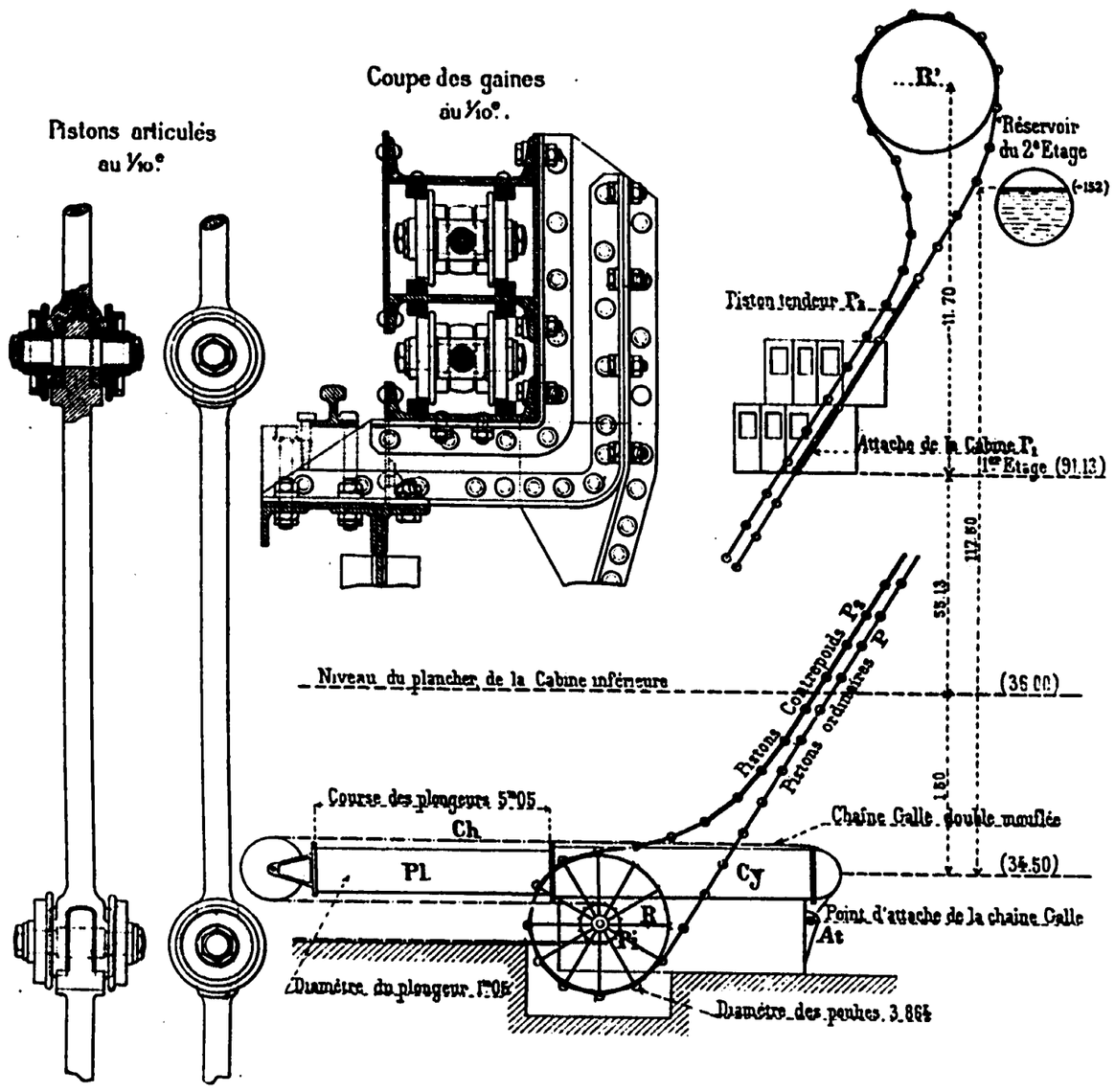


Fig. 141. — Schéma du système.

§ 2. — Description détaillée.

1° *Circuit des pistons articulés et sa gaine.* — Chaque circuit est d'une longueur moyenne de 180,90 *m*, composée comme suit :

1	piston d'attache de la cabine	Longueur.	2,90 *m*
1	— spécial placé au dessous	—	1,00
81	— ordinaires de 1,00 *m*	—	81,00
11	— contrepoids de 1,00 *m*	—	11,00
81	— ordinaires de 1,00 *m*	—	81,00
2	— tendeurs (long. moy. 2,00 *m*)	—	4,00
	Longueur totale moyenne du circuit		180,90 *m*

Dans la portion correspondant à la course de la cabine, les deux parties de la gaine renfermant le circuit sont juxtaposées (voir fig. 14, Pl. XXIII).

La gaine double est formée par trois fers en U de 250 *mm* de hauteur maintenus par des fers plats, de manière à ménager deux intervalles rectangulaires de 195 *mm* de hauteur. Dans l'intérieur de chacun d'eux sont rivés quatre fers de 32 *mm* sur 25, servant de chemin de roulement aux galets portés par les extrémités des articulations des pistons.

Chacun des galets, de 140 *mm* de diamètre, roule soit sur le rail supérieur, soit sur le rail inférieur lui correspondant, ces deux rails étant à 145 *mm* l'un de l'autre.

La partie de la gaine correspondant au brin supérieur du circuit est complètement fermée, celle corres-

pondant au brin inférieur a une fente longitudinale de 85 *mm* de hauteur, laissant le passage libre aux tôles reliant la cabine au piston d'attache.

Les pistons courants ont, comme nous l'avons dit, une longueur d'un mètre d'axe en axe d'articulation. Ils sont formés de barres en fer forgé de 45 *mm* de diamètre (fig. 5 et 6) terminées à une extrémité par une fourche et à l'autre par une partie méplate venant s'articuler avec la fourche du piston précédent. Les articulations sont formées d'axes en acier de 50 *mm* de diamètre, portant à leurs extrémités les galets de roulement en acier coulé.

Chacun des pistons porte près de la partie méplate deux épaulements sur lesquels viennent agir les dents en acier de la poulie motrice. Les galets sont maintenus sur les axes d'articulation au moyen d'écrous et de rondelles ; ils sont munis de coussinets en bronze. Le poids d'un piston courant, y compris ses galets, est de 27 *kg*.

Attache de la cabine. — L'attache de la cabine au circuit (Pl. XXIII[bis], fig. 24 à 27, 30-33 et 34) a lieu par l'intermédiaire de fers plats reliés aux brancards de la cabine par douze boulons en acier de 22 *mm* de diamètre. Ces fers plats sont terminés par des fourches servant l'une à l'articulation avec le piston tendeur, l'autre avec le piston placé au-dessous de la cabine. Cette dernière porte un œil laissant à l'articulation un jeu de 50 *mm*.

L'élément spécial, placé au-dessous du piston d'attache, est analogue aux pistons courants ; il en diffère en ce qu'il n'a pas de talons et que l'axe d'articulation à la partie supérieure ne porte pas de galets à ses extrémités.

Pistons tendeurs (Pl. XXIII, fig. 9 et 10). — Les extrémités d'articulation des pistons tendeurs sont analogues à celles des pistons ordinaires, c'est-à-dire à tête mâle d'un côté et à chape femelle de l'autre. Elles sont prolongées par des tiges de 50 *mm* de diamètre, filetées en sens inverse et réunies par un tube cylindrique taraudé à l'intérieur, dans lequel sont vissées les pièces d'acier formant les écrous des tiges filetées. La rotation du tube et des écrous, dans un sens ou dans l'autre, a pour effet de diminuer ou d'augmenter la distance entre les extrémités du piston, c'est-à-dire la longueur de ce dernier, qui, au maximum, est de 2,225 *m*. Comme les écrous peuvent se déplacer de 0,25 *m* le long de chacune des tiges, la longueur minimum est de 1,725 *m*.

Le tube est percé de trous disposés en spirale, dans lesquels on peut introduire, par la fente de la gaine, une tige de fer pour le faire tourner et faire varier la longueur du piston. La course est limitée par une rondelle fixée à l'extrémité de la tige filetée. A chaque extrémité, des tiges filetées sont entourées d'un tube de recouvrement en fer, dans lequel peut coulisser le tube portant les écrous. Une vis de serrage est disposée de manière à empêcher la rotation du tube, une fois le réglage opéré.

Comme chacun des circuits comporte deux pistons tendeurs, leur longueur peut varier de 1 *m*, suivant que ces pistons sont plus ou moins allongés.

Pistons contrepoids. — Les pistons contrepoids (Pl. XXIII, fig. 7 et 8) sont tout à fait analogues aux pistons courants ; seulement leurs tiges, au lieu d'être cylindriques, sont formées de fers carrés de 55 *mm* de côté. Ces tiges sont entourées par des boîtes en fonte de 810 *mm* de longueur, formées de deux pièces réunies entre elles par quatre boulons à tête noyée traversant la tige et dans lesquelles sont placés des morceaux de plomb. Chacun de ces pistons pèse 116 *kg* de plus que les pistons ordinaires.

2° *Roues motrices et poulies de renvoi.* — Les roues motrices R, de 3,864 *m* de diamètre (Pl. XXIII, fig. 3 et 4, et Pl. XXIII[bis], fig. 35, 36 et 40) ont douze bras formés chacun de deux fers plats entretoisés par d'autres fers rivés sur eux. La jante est formée de deux cornières entre lesquelles sont maintenues les dents. Ces dernières, formées de morceaux d'acier ayant la forme d'un C (fig. 36), sont disposées à l'extrémité de chacun des bras, elles sont fixées chacune à la jante au moyen de trois boulons d'acier.

Le moyeu intérieur (fig. 35 et 40) en fer forgé est maintenu par douze boulons traversant en même temps les deux fers formant chacun des bras. La partie extérieure de ce moyeu est formée, de chaque côté, de cinq disques en fer de 8 *mm* d'épaisseur, d'un diamètre extérieur décroissant.

La roue est fixée par trois robustes clavettes sur l'arbre moteur de 260 *mm* de diamètre, qui porte en même temps les pignons de chaîne de Galle.

Les poulies de renvoi du haut, de 3,646 *m* de diamètre (fig. 1 à 6, Pl. XXIII[bis]), sont construites de la

même manière que les roues motrices, avec cette différence qu'elles ne comportent pas de dents servant d'appui à la chaîne, et que leur jante est lisse. En outre, le moyeu intérieur a été supprimé.

Chaînes de Galle et pignons. — Afin d'éviter les efforts extérieurs et de consolider les attaches des viroles du cylindre, les deux chaînes de Galle faisant partie de chacun des mécanismes moteurs ont leurs extrémités fixées au-dessous de ce cylindre, sur le bâti qui le supporte. Elles s'enroulent sur le fond du cylindre, passent ensuite au-dessus de celui-ci, pour venir sur les deux poulies de mouflage disposées à l'extrémité du piston, et actionnent ensuite les pignons fixés à l'arbre moteur (Pl. XXIII, fig. 3).

Comme les portions de chaînes disposées au droit du cylindre restent immobiles, c'est-à-dire ne s'enroulent ni ne se déroulent, on les a formées chacune de quatre barres d'acier entretoisées par des boulons. Ces barres, de 5,81 *m* de longueur, ont une section de 108×20.

Les chaînes en acier (Pl. XXIII[bis], fig. 56 et 57) sont divisées en trois cours de maillons laissant entre eux deux intervalles de 40 *mm* dans lesquels passent les dents des pignons. Ces intervalles sont maintenus par des viroles en acier sur lesquelles agissent les pignons. Les plaquettes sont des barreaux d'acier de 8 *mm* d'épaisseur et de 108 *mm* de hauteur, ayant une longueur de 130 *mm* d'axe en axe des boulons d'articulation, lesquels ont un diamètre de 44 *mm*. Le nombre des plaquettes dans une section transversale est de huit.

La longueur totale d'axe en axe des articulations extrêmes de chaque chaîne est de 28,03 *m*. La longueur de la portion qui vient en contact avec les dents du pignon est le double de la course des plongeurs, soit 10,101 *m*.

Les deux chaînes de Galle, faisant partie de chacun des mécanismes moteurs indépendants, passent sur les poulies de mouflage fixées à l'extrémité du piston ; celles-ci sont en fonte et ont un diamètre d'enroulement de 1,68 *m* (Pl. XXIII[bis], fig. 51 et 52). Ces chaînes viennent ensuite actionner deux pignons fixés sur l'arbre moteur (fig. 48 et 48[bis]).

Ces pignons sont formés d'une pièce d'acier corroyé de 0,60 *m* de longueur ; chacun d'eux porte deux couronnes de dents qui ont 38,5 *mm* d'épaisseur à la base et 15 *mm* au sommet. Les deux couronnes d'un pignon sont à 70,5 *mm* l'une de l'autre et portent chacune 14 dents; le pas est de 130 *mm*.

Les deux pignons sont enfermés dans une boîte en fonte de 1 *m* de largeur (fig. 42, 43 et 44). A la partie inférieure de cette boîte sont disposées des languettes qui décollent les chaînes des dents des pignons. A la descente, les chaînes qui se déroulent sur les pignons pénètrent dans des gaines de refoulement étanches remplies d'huile et servant au graissage (Pl. XXIII, fig. 3).

Les arbres moteurs, disposés dans le prolongement l'un de l'autre, ont chacun une longueur de 2,553 *m* et peuvent au besoin être manchonnés.

Cylindres et pistons hydrauliques. — Chaque cylindre, d'une longueur totale de 6,00 *m*, est en tôle et construit comme un bouilleur de chaudière; son diamètre intérieur varie de 1,21 *m* à 1,18 *m* (Pl. XXIII, fig. 3, 4 et 11, et Pl. XXIII[bis], fig. 41, 45 et 50). La partie moyenne est constituée par trois viroles en fer de 15 *mm* d'épaisseur et de 1,60 *m* entre les lignes de rivets de jonction.

La première virole du côté du presse-étoupes est en acier soudé; elle a une épaisseur suffisante pour avoir, après alésage, une épaisseur minimum de 15 à 16 millimètres, et son extrémité est renforcée par un fer cornière ; le presse-étoupes est placé dans son intérieur (fig. 50).

Le fond du cylindre (fig. 28 et 29) est constitué par une tôle emboutie de 17 *mm* d'épaisseur; sur ce fond est fixé un sommier en fonte sur lequel passent les deux chaînes de Galle.

On a disposé à l'intérieur du cylindre deux glissières fixées par des boulons, sur lesquelles vient reposer le piston (fig. 41 et 45).

Le piston plongeur est en fonte de 30 *mm* d'épaisseur; son diamètre extérieur est de 1,05 *m*. Le fond postérieur est représenté figure 50 ; il porte une oreille destinée à fermer automatiquement l'arrivée d'eau quand le plongeur est à fin de course (figures 46 et 47). Le fond antérieur est représenté figures 53 et 54. Le corps du plongeur est formé de deux parties cylindriques réunies par douze boulons placés sur des couronnes venues de fonte à l'intérieur, et consolidées par des nervures.

A la partie antérieure de ce plongeur sont fixées deux flasques en tôle, portant l'arbre commun aux deux poulies de mouflage des chaînes de Galle (Pl. XXIII, fig. 3 et 11).

Ces poulies (Pl. XXIII bis, fig. 51 et 52) ont leurs jantes tournées, et portent, pour maintenir les chaînes, deux couronnes en saillie. Les plaquettes constituant les maillons de chaîne viennent appuyer par leur partie inférieure sur la jante, et des viroles entourant les boulons d'articulation viennent appuyer sur la surface extérieure des couronnes saillantes, de sorte que tout mouvement latéral de la chaîne est évité.

Boîtes à soupapes et arbre à cames. — La distribution de chacun des cylindres hydrauliques (Pl. XXIII, fig. 13 et 15 à 18) est commandée par l'intermédiaire d'une boîte contenant deux soupapes semblables ouvrant toutes deux de haut en bas, quand on exerce une pression sur le sommet de leurs tiges qui font saillie au-dessus de la boîte.

La soupape S (voir schéma ci-contre, fig. 142) sert à l'admission ; l'autre, S_1, à l'évacuation. S communique par sa partie inférieure avec l'eau sous pression par une tubulure de 200 *mm* ; S_1 communique par sa partie supérieure avec l'évacuation.

Le milieu de la boîte est mis en relation avec le cylindre hydraulique. Une soupape de choc, destinée à éviter les coups de bélier, est interposée entre la boîte et le cylindre.

La pression de l'eau applique les soupapes sur leur siège. Une pression sur le haut de leur tige, produite par la rotation d'une came, fait ouvrir l'une ou l'autre et met ainsi en communication le cylindre avec l'évacuation ou l'admission.

Un ressort R_1, R_2, placé à la partie inférieure de chaque soupape, ramène celle-ci sur son siège dès que la came n'agit plus.

La tension de ces ressorts, enfermés dans des boîtes en fonte boulonnées à la boîte à soupapes, se règle au moyen d'écrous E_1, E_2.

La boîte à soupapes est en fonte, les soupapes sont en bronze. Les parties portantes de ces dernières sont des rondelles de bronze qui peuvent être facilement remplacées quand elles sont usées.

L'arbre à cames commandant les soupapes (Pl. XXIII, fig. 19, 20 et 21) est actionné depuis la cabine par l'intermédiaire de deux câbles, et automatiquement aux fins de course, par le piston hydraulique.

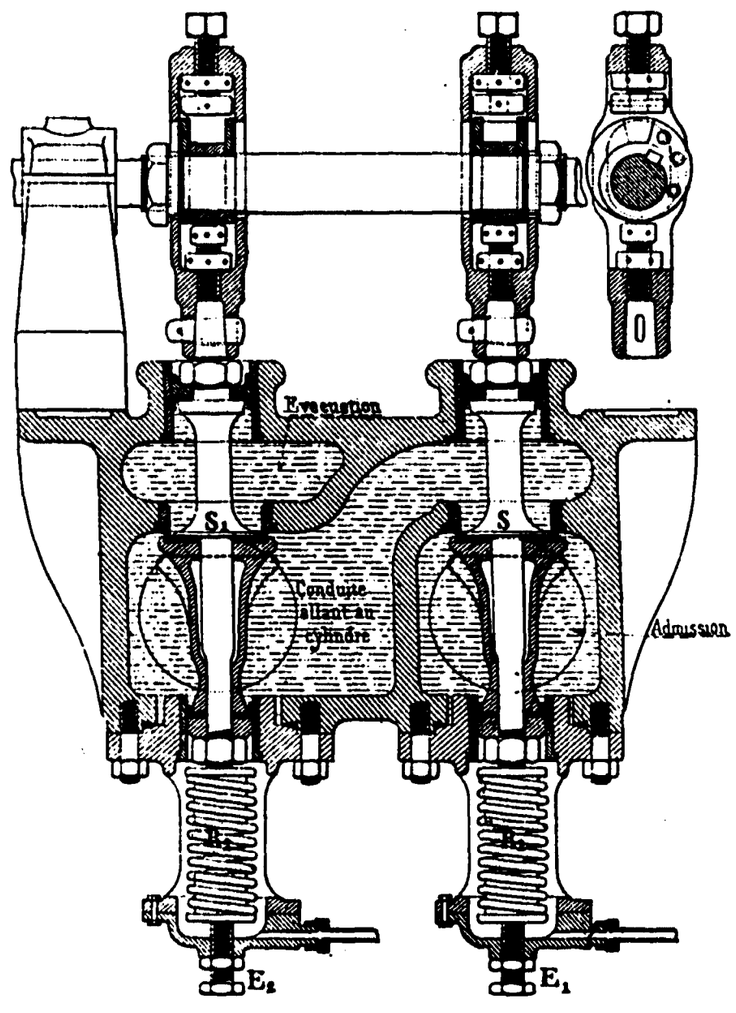


Fig. 142. — Coupe des distributeurs au 1/8e.

Cet arbre est formé de deux parties symétriques portant chacune les cames nécessaires à la commande des soupapes du moteur de chaque circuit. La came correspondant à l'admission a la forme d'une virgule, tandis que celle qui commande l'échappement est un excentrique ordinaire.

Les deux câbles de manœuvre sont attachés à deux poulies Po_1 et Po_2, fixées sur l'arbre à cames (Pl. XXIII, fig. 3 et 11); les points d'attache sont disposés de telle sorte qu'une traction exercée sur l'un des brins fasse tourner l'arbre et les cames qu'il porte, dans le sens voulu. Quand l'arbre est dans la position moyenne, les cames n'agissent pas sur les soupapes, ces dernières sont fermées et l'ascenseur est au repos.

Deux leviers de butée, placés à côté des poulies des câbles de manœuvre, limitent la rotation de l'arbre, afin qu'une traction trop prolongée, exercée sur l'un des câbles, ne fasse pas exécuter une rotation complète à cet arbre et ne renverse la distribution.

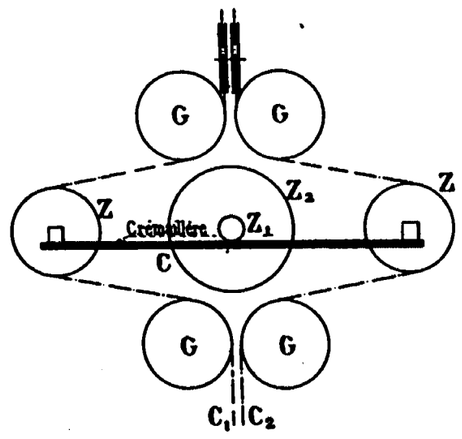
Ces câbles aboutissent à la cabine d'où se fait la manœuvre. A la fin de la course, l'arbre est manœuvré automatiquement par les pistons hydrauliques eux-mêmes.

Chacun des câbles de manœuvre, attaché, comme nous l'avons vu, à une poulie Po montée sur l'arbre à cames (voir schéma ci-contre, fig. 143), vient passer sur une poulie de renvoi R placée à la partie inférieure de la

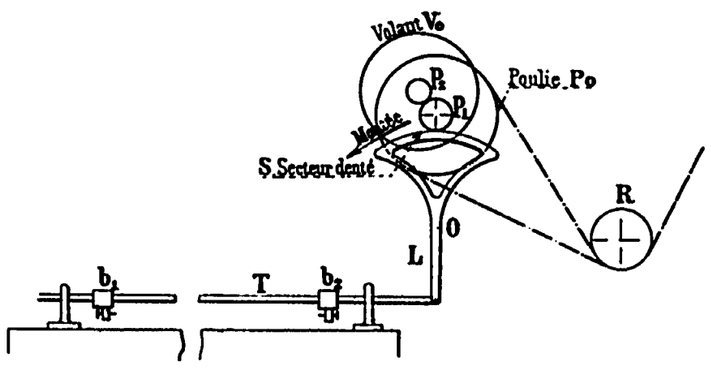
Tour, et de là sur des galets G portés par la cabine. Il est fixé à la partie supérieure des poutres de l'ascenseur par l'intermédiaire d'un tendeur. La manœuvre à la main depuis la cabine s'exécute en tournant, dans un sens ou dans l'autre, un volant Z_3, sur l'arbre duquel est monté un pignon Z_1.

Ce pignon engrène avec une crémaillère C portant à chacune de ses extrémités un galet Z sur lequel passe un des câbles de manœuvre C_1 C_2. La crémaillère, se déplaçant dans une direction ou dans l'autre, suivant le sens de la rotation du volant, exerce une traction sur un des câbles et fait ouvrir la distribution correspondante; les butoirs dont nous avons parlé limitent ce mouvement. L'ensemble de ces dispositions est représenté dans les figures 7, 8, 9 et 10 de la Pl. XXIII[bis].

A fin de course, haut et bas, l'ascenseur doit s'arrêter automatiquement; à cet effet, sur chacune des extrémités de l'arbre à cames est monté un pignon p_1.



Commande des câbles de manœuvre



Commande de l'arbre à cames du distributeur

Fig. 113.

Un levier L, oscillant autour de son centre O, et portant à la partie supérieure un secteur denté S, actionne chacun de ces pignons. La partie inférieure de ce levier est reliée à une tringle T portant deux butées b_1 et b_2: le piston hydraulique porte un butoir qui, à la fin de chaque course, vient frapper contre l'une de ces butées et ramène, en agissant sur le levier et sur le pignon, l'arbre à cames dans sa position intermédiaire où, toutes les soupapes étant fermées, l'ascenseur est au repos.

Un volant Vo, dont l'axe porte un pignon p_2 engrenant avec p_1, permet au mécanicien placé dans le sous-sol de commander la distribution (voir pour les détails les figures 3, 4 et 11 de la Pl. XXIII).

3° *Cabines.* — La cabine (Pl. XXIII, fig. 3 et 4), d'une largeur de 3,20 *m*, en tôle avec panneautage intérieur en bois, est divisée en deux étages auxquels on accède à chaque station par des escaliers terminés par des paliers. Chacun des étages est muni de banquettes et disposé pour recevoir cinquante personnes. La cabine est portée sur la voie de roulement par l'intermédiaire de deux essieux munis de galets à double boudin de 600 *mm* de diamètre (Pl. XXIII[bis], fig. 31 et 32).

L'écartement de la voie est de 3,64 *m* d'axe en axe; elle est constituée par des rails à patin en acier de 75 *mm* de hauteur, fixés sur des longrines en bois par des tirefonds et des boulons à crochet reliés à la semelle du chemin de roulement (fig. 14).

Pour éviter toute tendance au renversement de la cabine dans le cas où le public se porterait plus d'un côté que de l'autre, on a placé sur le bord inférieur du dessus du longeron, du côté de la cabine, une cornière. Un galet Ga de 240 *mm*, relié à la cabine (Pl. XXIII, fig. 3), roule sur le bord inférieur de l'aile verticale de cette cornière, lorsqu'il y a tendance au renversement; il en est à quelques millimètres de distance en temps ordinaire.

Le conducteur chargé de la manœuvre des câbles de commande est installé dans un poste placé en avant de la cabine inférieure.

Le poids propre de la cabine complète est de 6.400 *kg*. Comme elle est destinée à recevoir 100 voyageurs dont le poids moyen est de 70 *kg*, sa surcharge est de 7.000 *kg* et le poids de la cabine pleine est 13.400 *kg*.

En raison de l'emploi des pistons articulés et des dimensions données aux pièces constitutives de l'appareil, il a été jugé superflu de munir la cabine d'appareils de sûreté spéciaux.

Du reste, l'appareil est en réalité double, puisqu'il y a deux circuits et deux cylindres hydrauliques indépendants, et que chacun d'eux, à défaut de l'autre, peut supporter la cabine.

Cette observation montre qu'il n'y a aucun inconvénient, au point de vue de la sécurité, à faire travailler à la traction le circuit des pistons articulés : s'il devait fonctionner à la compression, il donnerait lieu à des frottements considérables dans les gaines, résultant de la position en zigzag que prendraient les pistons.

§ 3. — Fonctionnement.

Quand la cabine est à l'arrêt au bas de sa course, toutes les soupapes sont fermées ; l'eau qui remplit la distribution n'a aucune issue, le plongeur est complètement rentré dans le cylindre, le secteur denté S qui commande la tringle T et les butées b_1, b_2 (voir schéma, fig. 143) est vertical, la crémaillère C qui commande les câbles de manœuvre C_1, C_2, est dans la position centrale.

Montée. — Le conducteur placé dans la cabine tourne le volant Z_2 de droite à gauche, le pignon Z_1 pousse la crémaillère de gauche à droite, le câble C_1 de montée est tiré et fait tourner la poulie Po et par suite l'arbre à cames. Les cames d'ouverture pressent sur les soupapes d'admission S (voir fig. 142), tandis que, les cames de fermeture S' ne comprimant plus les soupapes d'échappement, celles-ci sont fortement appliquées sur leurs sièges ; la pression de l'eau se transmet donc dans les cylindres. Les plongeurs sortent de leurs cylindres et déterminent, au moyen du mécanisme déjà décrit, l'ascension de la cabine.

Quand elle est près d'arriver à fin de course, le conducteur tourne le volant Z_2 en sens contraire de celui de la montée, de manière à mettre le mécanisme à l'arrêt comme il était au départ. Du reste, trois dispositions concourent, en dehors du conducteur, à produire cet arrêt :

1° Le mécanicien qui met en mouvement le volant Vo, lequel, par l'intermédiaire des pignons p_2 et p_1, agit sur l'arbre à cames.

2° Les secteurs S, en s'inclinant à la montée dans le sens de la flèche (fig. 143), avaient, en tirant les tringles T, rapproché les butoirs b_1 ; les plongeurs, en arrivant à l'extrémité de leur course, les repoussent et les secteurs reprennent ainsi automatiquement leur position verticale (point mort).

3° Les plongeurs, en arrivant à l'extrémité de leur course, opèrent eux-mêmes automatiquement l'arrêt, au moyen des obturateurs qui les terminent, lesquels ferment les tubulures d'arrivée d'eau dans les cylindres.

Descente. — Le conducteur tourne le volant Z_2 de gauche à droite, le pignon Z_1 pousse la crémaillère C de droite à gauche, le câble C_2 de descente est tiré et fait tourner la poulie P ; les soupapes d'admission se ferment, tandis que celles d'échappement s'ouvrent ; la cabine descend par son propre poids, les plongeurs sont refoulés dans l'intérieur des cylindres et l'eau retourne dans le réservoir d'aspiration des pompes.

En arrivant au bas de sa course, la cabine est mise à l'arrêt, soit par le conducteur, soit par le mécanicien placé près du volant Vo, soit automatiquement par les butoirs b_2.

§ 4. — Rendement.

L'eau sous pression actionnant les machines hydrauliques de chacun des ascenseurs provient des réservoirs placés sur la deuxième plate-forme et qui servent également à l'alimentation des ascenseurs Otis. Cette eau est amenée par une conduite en tôle de 250 *mm* de diamètre. L'eau d'évacuation se rend dans une bâche dont le niveau supérieur est à 3,60 *m* en contrebas des axes des cylindres, lesquels sont à la cote + 34,50.

Le niveau moyen de l'eau dans les réservoirs étant à la cote + 152 et celui du réservoir de décharge dans la pile 3 à la cote + 30, la hauteur totale de chute est de 122,00 *m*.

La dépense en eau pour une ascension est de $2 \times 5{,}05 \times \frac{\pi \times \overline{1{,}05}^2}{4} = 8{,}746\ m^3$; le travail moteur pour une course est de : $8.746 \times 122 = 1.067.000\ kgm$.

La cabine pouvant contenir 100 personnes d'un poids moyen de 70 *kg*, et s'élevant de 55,13 *m*, le travail utile est de : $7.000 \times 55{,}13 = 385.900\ kgm$.

Le rendement utile maximum est de $\frac{385.910}{1.067.000} = 0{,}363$.

La dépense en eau sous pression étant la même, quel que soit le nombre de voyageurs transportés, le rendement utile varie donc de 0 à 0,36.

Ce nombre de 100 personnes n'est pas réalisé dans la pratique; par suite du défaut de place dans les cabines, il a été réduit à 93, y compris les trois conducteurs, soit 90 voyageurs. Le rendement s'abaisse d'autant; il n'est plus que de 0,93×0,363 = 0,34, soit 34 p. 100, c'est-à-dire à peu près semblable à celui de l'ascenseur Otis.

Quant au rendement pratique en voyageurs montés, il est le suivant en marche régulière:

Montée du sol au 1er étage	60"
Arrêt au 1er étage. Sortie et entrée pour la descente	100
Descente	60
Arrêt au sol. Sortie et entrée pour la montée	110
Durée totale d'un voyage	330"

Soit 5'30" par voyage ou 11 voyages à l'heure.

On peut compter pratiquement sur une marche courante de 10 voyages à l'heure, lesquels en 10 heures et avec 90 voyageurs donnent 9.000 voyageurs par jour et par ascenseur, soit pour les deux 18.000 voyageurs.

Le nombre de 20.000 a été atteint dans certaines journées.

CALCULS DE L'ASCENSEUR

§ 1. — Détermination de la pression d'eau effective sur les plongeurs.

Le diamètre de chaque plongeur étant de 1,05 *m*, la surface active est de :

$$\frac{\pi \times \overline{1,05}^2}{4} = 8.655\ cm^2$$

et pour les deux de :

$$2 \times 8.655 = 17.310\ cm^2.$$

Le diamètre du tuyau d'amenée de l'eau sous pression étant de 0,250 *m*, sa section est de

$$\frac{\pi \times \overline{0,25}^2}{4} = 490\ cm^2.$$

Le rapport entre les sections des pistons et celle du tuyau est de

$$\frac{17.310}{490} = 35.$$

La course des plongeurs est de 5,05 *m*, et l'ascension de la cabine s'effectuant en 1 minute, la vitesse des plongeurs est de

$$\frac{5,05}{60} = 0,084\ m.$$

La vitesse V de l'eau dans la conduite est donc de :

$$V = 35 \times 0,084 = 2,94\ m.$$

Cette vitesse répond à une perte de charge par mètre courant donnée par la formule :

$$J = \frac{4}{D} \times 0,000533\,V^2$$

d'où

$$J = 0,0084\,V^2 = 0,073.$$

La longueur développée de la conduite est de 135 *m*, la perte de charge est de :

$$135 \times 0,073 = 9,85\ m.$$

En y ajoutant la hauteur génératrice de la vitesse

$$\frac{V^2}{2g} = 0,447$$

et les pertes de charges dues aux changements de direction, aux passages à travers les soupapes, nous admettrons que la perte totale est de 17,50 *m*, de sorte que la pression effective sur les pistons sera de :

$$117,50 - 17,50 = 100$$

soit 10 *kg* par cm^2, pression qu'on peut d'ailleurs rendre d'autant plus faible qu'on étrangle davantage l'eau à travers les soupapes.

La hauteur de 117,50 *m* résulte de la différence entre le niveau moyen des réservoirs du 2e étage (+ 152) et celui de l'axe des cylindres (+ 34,50).

§ 2. — Détermination des efforts à exercer sur le circuit dans les différentes hypothèses de surcharge de la cabine.

Chaque circuit comprend 176 pistons, dont un spécial de 3 *m* de longueur pour l'attache de la cabine, deux de 2 *m* de longueur, dits tendeurs, et pesant 80 *kg* chacun, puis onze dits de contrepoids de 1 *m* de longueur pesant 150 *kg* chacun, enfin 163 ordinaires de 1 *m* de longueur également et pesant 27 *kg* l'un.

Le poids de la cabine et de ses attaches étant de 6.400 *kg* et la charge des 100 voyageurs de 7.000 *kg*, le diagramme des forces qui agissent sur le circuit sera celui indiqué dans la figure n° 144 de la page suivante.

De ce diagramme, on déduit d'abord la connaissance des tensions et efforts dans les diverses parties du circuit, et comme conséquence les conditions de résistance des pièces de ce circuit.

L'effort à exercer sur un piston pour le faire cheminer en remontant le long du plan incliné se fractionne en trois parties :

1° La composante du poids du piston suivant le chemin de roulement;
2° Le frottement des fusées des galets sur leurs tourillons;
3° Le frottement de roulement des galets sur leur chemin.

On a donc, si on représente par :

i l'angle d'inclinaison du chemin de roulement

$$i = 54°5' \begin{cases} \sin i = 0,815 \\ \cos i = 0,579 \\ \text{tg}\, i = 1,406 \end{cases}$$

p le poids d'un piston courant muni de ses deux galets : $p = 27\ kg$.
d le diamètre de l'axe des galets : $d = 0,01$
D — des galets à la jante : $D = 0,14$.
$f = 0,10$ le coefficient de frottement des axes sur leurs tourillons.
$\varphi = 0,003$ le coefficient de roulement des galets sur leur chemin.
t l'effort à exercer pour remonter le piston.

$$t = p \sin i + p \cos i \left(f \frac{d}{D} + \varphi \right)$$

A la descente, au contraire, le piston descendra sous l'action d'une force :

$$t' = p \sin i - p \cos i \left(f \frac{d}{D} + \varphi \right)$$

Quand la cabine est au bas de sa course, le nombre des pistons courants jusqu'à l'axe de la poulie de renvoi est de 74 qui, à 27 *kg* l'un, donnent un poids de

$$74 \times 27 = 1.998\ kg$$

auquel s'ajoute celui des deux pistons tendeurs, soit 160 *kg*.

Le poids du circuit considéré est ainsi de 2.158 *kg*.

L'effort qui s'oppose au mouvement d'ascension est ainsi de :

$$t_a = 2.158 \times 0,815 + 2.158 \times 0,579 \left(0,1 \times \frac{0,04}{0,14} + 0,003 \right)$$

$$t_a = 2.158 \times 0,815 + 2.158 \times 0,579 \times 0,0315$$

$$t_a = 1.759 + 39,5 = 1.798,5\ kg.$$

A la descente, la chaîne des pistons descendrait sous l'action d'une force

$$t'_a = 1.759 - 39,5 = 1.719,5$$

Les mêmes formules s'appliquent au mouvement de la cabine, qui pèse pleine 13.400 *kg* et vide 6.400 *kg*, dont la moitié seulement agit sur le circuit qui est double.

Le diamètre des fusées est de 0,10 *m* et celui des galets de 0,60 *m*.

A la montée, l'effort qui s'oppose au mouvement est pour la cabine pleine :

$$t_b = \frac{13.400}{2} \times 0,815 + \frac{13.400}{2} \times 0,579 \left(0,1 \times \frac{0,1}{0,6} + 0,003 \right)$$

$$t_b = 5.460 + 76,5 = 5.536,5\ kg$$

et pour la cabine vide :

$$t_c = \frac{6.400}{2} \times 0,815 + 76,5 \times \frac{6.400}{13.400} = 2.608 + 37$$

ou

$$t_c = 2.645\ kg$$

A la descente, les efforts sont :
Cabine pleine :

$$t'_b = 5.460 - 76,5 = 5.383,5\ kg$$

Cabine vide :

$$t'_c = 2.608 - 37 = 2.571\ kg$$

Les efforts totaux sont donc :

Montée..	Cabine pleine	$T = 5.536,5 + 1.798,5$	$= 7.335\ kg$
	— vide.....	$T = 2.645 + 1.798,5$	$= 4.443,5\ kg$
Descente.	Cabine pleine.....	$T = 5.383,5 + 1.719,5$	$= 7.103\ kg$
	— vide.....	$T = 2.571 + 1.719,5$	$= 4.290,5\ kg$

Ces tensions connues, on déduit celle T' exercée sur les pistons quittant l'autre côté de la poulie de renvoi, en remarquant qu'elle est égale à T, augmentée de la force nécessaire pour vaincre les frottements de la poulie de renvoi sur ses tourillons.

Ces derniers sont déterminés par une force R qui est la résultante des forces T, T' et du poids P = 2.000 *kg* de la poulie, on a :

$$T' = T \pm R\left(0{,}1 \times \frac{0{,}12}{3{,}527}\right).$$

R étant lui-même fonction de T', nous résoudrons l'équation ci-dessus par approximations successives en faisant au début T' = T et construisant R géométriquement, l'angle de T et T' (c'est-à-dire du piston entrant sur la poulie de renvoi et de celui qui la quitte) étant de 38° environ (voir fig. 145).

Pour T = 7.335, on trouve :

$$R_1 = 16.000\ kg$$
$$T' = 7.335 + 16.000\left(0{,}1 \times \frac{0{,}12}{3{,}527}\right)$$
$$T' = 7.335 + 16.000 \times 0{,}0034$$
$$T' = 7.335 + 54{,}4 = 7.389{,}4\ kg.$$

En construisant un second polygone funiculaire avec cette valeur de T', on trouve :

$$R_2 = 16.100\ kg$$

valeur que nous admettrons comme suffisamment approchée ; il en résulte comme valeur finale de T' :

$$T' = 7.335 + 16.100 \times 0{,}0034 = 7.335 + 54{,}74$$

ou en nombres ronds

$$T' = 7.390\ kg.$$

En opérant de même pour les trois autres valeurs de T, on arrive aux valeurs suivantes de R et de T' :

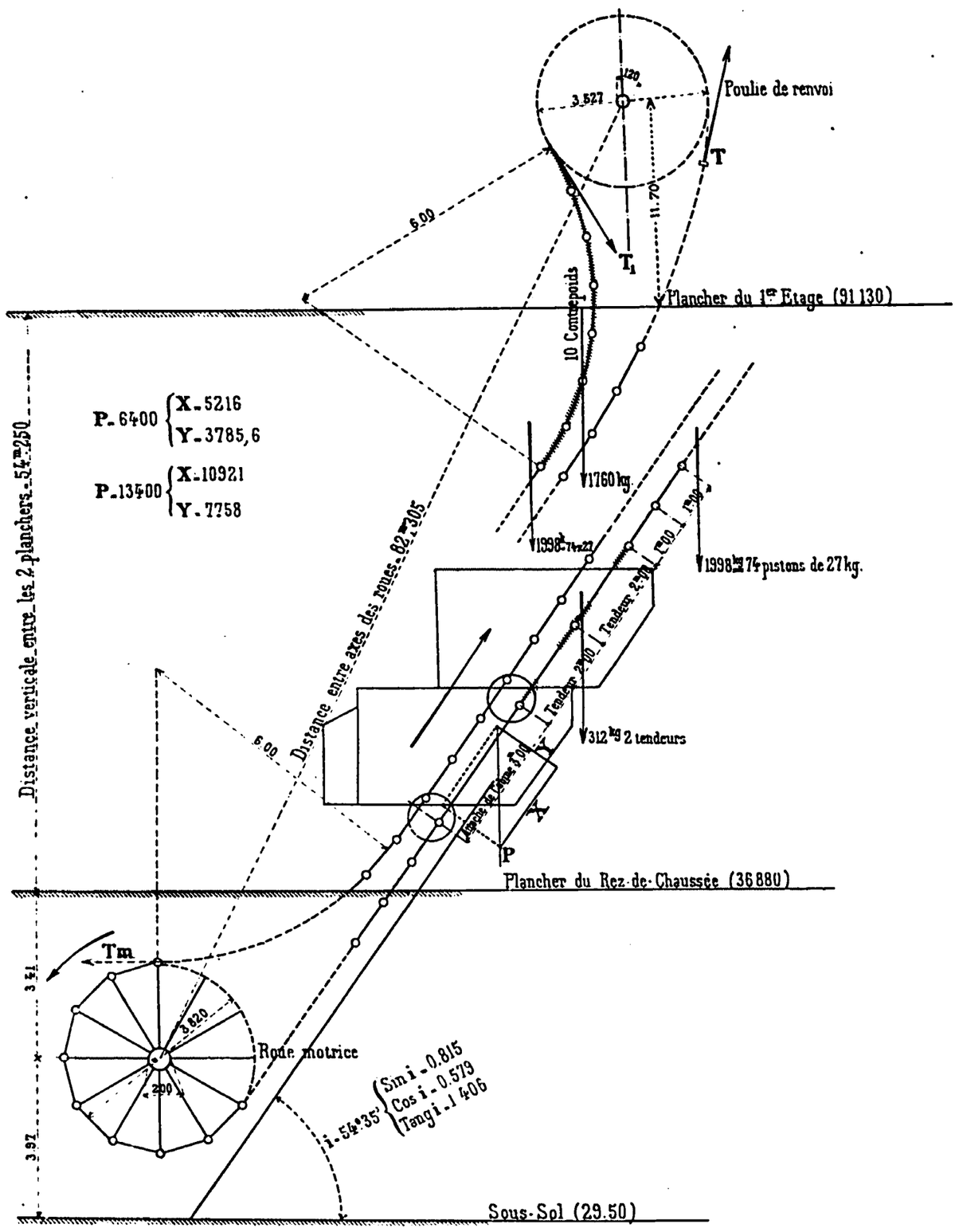


Fig. 144. — Schéma donnant les dimensions principales.

Montée ...	Cabine chargée : R = 16.100 *kg*	T' = 7.335 + 16.100 × 0,0034 = 7.390 *kg*
	Cabine vide : R = 10.780 *kg*	T' = 4.443,5 + 10.780 × 0,0034 = 4.480 *kg*
Descente ..	Cabine chargée : R = 15.250 *kg*	T' = 7.103 — 15.250 × 0,0034 = 7.051 *kg*
	Cabine vide : R = 10.000 *kg*	T' = 4.200,5 — 10.000 × 0,0034 = 4.256,5 *kg*

De ces tensions enfin on conclut pour expression de celle (T_m) à l'origine de la roue motrice :

$$T_m = T' - \Sigma p \sin i \pm \Sigma p \cos i \left(f\frac{d}{D} + \varphi\right)$$

dans laquelle la quantité entre parenthèses a pour valeur 0,0315.

Σp se compose du poids des contrepoids, 1.050 *kg*, et du poids de 71 pistons courants, 1.998 *kg*, donnant un total de 3.648 *kg*.

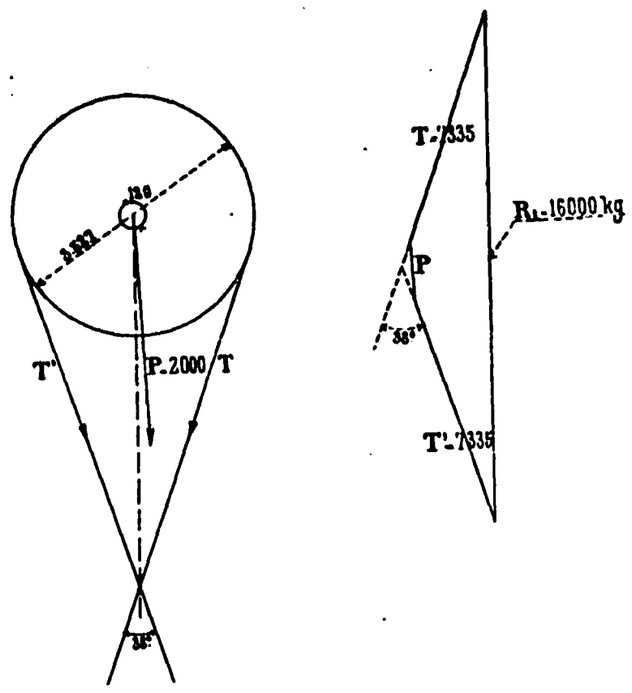


Fig. 145.

On a donc :

Montée. { Cabine chargée. { $T_m = 7.390 - 3.648 \times 0{,}815 + 3.648 \times 0{,}0182$ $= 7.390 - 2.973 + 67 = 4.484\ kg$; — vide.... $T_m = 4.480 - 2.973 + 67 = 1.574$

Descente. { Cabine chargée. $T_m = 7.051 - 2.973 - 67 = 4.011$; — vide.... $T_m = 4.250{,}5 - 2.973 - 67 = 1.216{,}5$

Les résultats précédents se résument dans le tableau ci-dessous :

NATURE DE LA CHARGE.	TENSION T A L'ENTRÉE DANS LA POULIE DE RENVOI *kg*	TENSION T' A LA SORTIE DE LA POULIE DE RENVOI *kg*	TENSION T_m A L'ORIGINE DE LA POULIE MOTRICE *kg*	RÉSULTANTE R DES TENSIONS TT' ET DU POIDS *kg*
La cabine s'élève pleine.....	7.335	7.390	4.484	16.100
— — vide.....	4.443,5	4.480	1.574	10.780
La cabine descend pleine .. .	7.103	7.051	4.011	15.250
— — vide.....	4.290,5	4.250,5	1.216,5	10.000

Ces tensions déterminées, on en déduit, sans aucune difficulté, les fatigues du circuit, des poulies de renvoi et des poulies motrices.

Pièces du circuit. — Chaque tige ayant 45 *mm* de diamètre, sa section est de 1.590 mm^2.

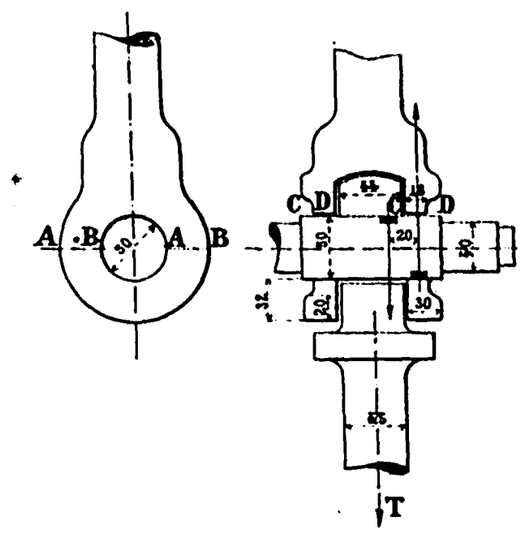


Fig. 146.

La traction maxima dans les parties rectilignes du circuit étant de 7.390 *kg*, la fatigue par mm^2 est de :

$$R = \frac{7.390}{1.590} = 4{,}65\ kg.$$

La compression au contact (CD — CD) de l'axe et du bout femelle (voir fig. 146), atteint la valeur par mm^2 de :

$$N = \frac{7\ 390}{2 \times 18 \times 50} = 4{,}1\ kg.$$

L'axe est soumis à un moment de flexion pouvant atteindre, en négligeant l'action sur les galets, la valeur :

$$\mu = 0{,}02 \times \frac{7.390}{2} = 73{,}9.$$

d'où des tensions et des compressions dans les fibres de :

$$R = \frac{\mu}{\frac{I}{r}} = \frac{\mu}{\frac{d^3}{32}} = \frac{32\mu}{d^3} = \frac{10{,}2}{d^3} \times \mu = 6{,}1\ kg \text{ par } mm^2$$

et un effort tranchant dans la section :

$$T = \frac{4}{3} \times \frac{T}{2\Omega} = \frac{4}{3} \times \frac{7.390}{2 \times 1.983} = 2{,}62\ kg$$

Ces chiffres n'ont rien d'exagéré; mais comme ils sont établis pour des charges statiques, ils s'augmenteront sensiblement pendant le mouvement.

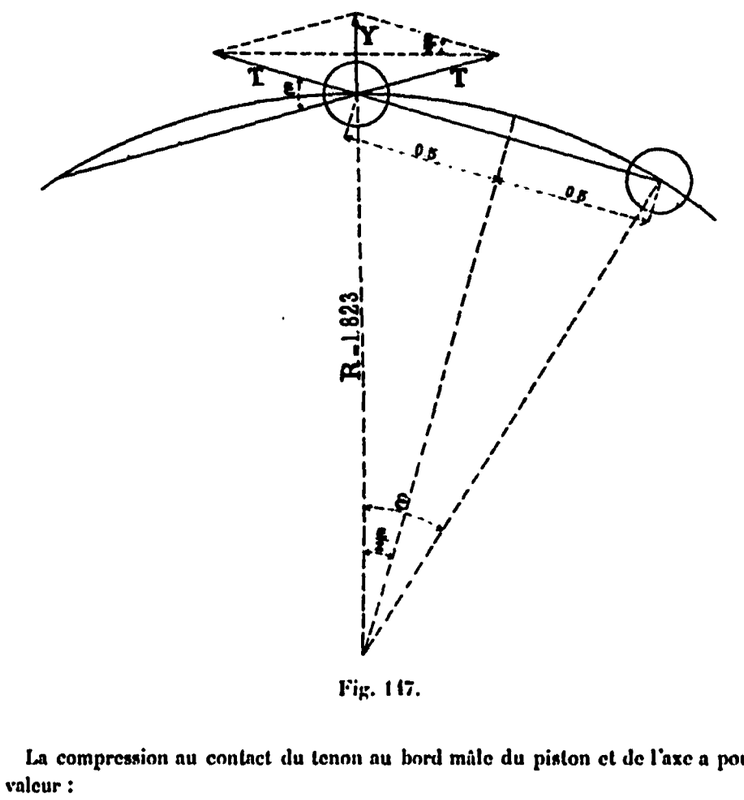


Fig. 147.

La compression au contact du tenon au bord mâle du piston et de l'axe a pour valeur :

$$N = \frac{7.390}{50 \times 44} = 3{,}36\ kg.$$

Cette pression un peu trop élevée rend le graissage difficile et tend à amener une usure assez sensible, ce qui s'est produit en usage.

Le parcours dans les gaines aboutissant aux roues donne naissance dans chaque circuit à une pression sur les axes des galets, mais les rayons de ces raccordements sont supérieurs à celui de la poulie de renvoi, et c'est sur celle-ci que se produisent les pressions maximum.

On a (voir fig. 147) :

$$Y = 2T \sin \frac{\varepsilon}{2}$$

Or

$$\sin \frac{\varepsilon}{2} = \frac{0{,}5}{1{,}823} = 0{,}272$$

d'où

$$Y = 2 \times 7.390 \times 0{,}272 = 4.020\ kg.$$

La pression sur l'axe des galets qui, dans les parcours rectilignes, ne dépasse pas $\frac{27}{2}\ kg$ pour les pistons ordinaires et $\frac{80}{2}\ kg$ pour les tendeurs, devient donc sur les poulies supérieures :

$$F = \frac{4.020}{2} = 2.010\ kg$$

pour chaque axe.

Elle correspond à une compression par mm^2 de

$$N=\frac{2.010}{40\times50}=1\,kg$$

à une tension des fibres :

$$R=\frac{10,2}{d^3}\times2.010\times0,025=8,02\,kg.$$

Ce chiffre correspond à une fatigue dans les gaines qui a nécessité des dispositions et des renforcements spéciaux.

Poulie de renvoi. — La poulie de renvoi est supportée par un arbre de 0,175 m

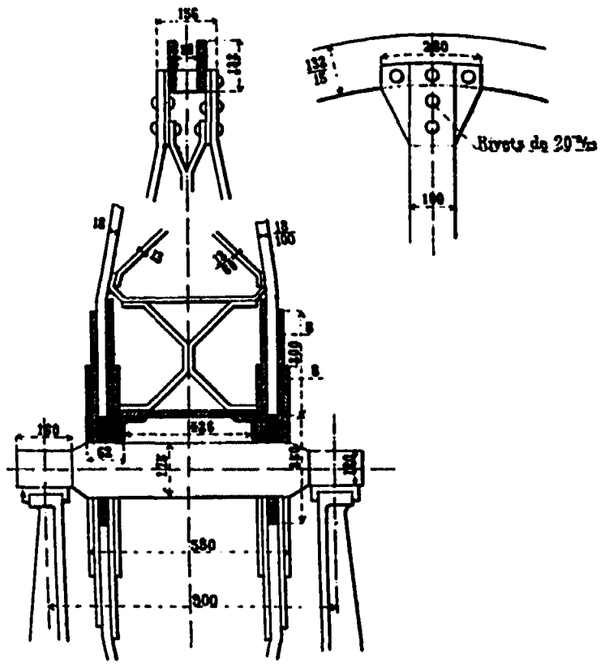


Fig. 148.

de diamètre (voir fig. 148), terminé par des tourillons dont la distance entre axes est de 0,90 m. L'effort total supporté par ces poulies pouvant atteindre 16.100 kg, chaque tourillon peut se trouver soumis à un effort de 8.100 kg en nombre rond.

La compression au contact du tourillon et du coussinet atteint dans ce cas la valeur :

$$N=\frac{8.100}{100\times120}=0,420\text{ par }mm^2.$$

Les tensions et compressions des fibres sont de

$$R=\frac{10,2}{d^3}(8.100\times0,08)=3,80\,kg\text{ par }mm^2$$

et l'effort tranchant a pour expression :

$$T=\frac{4}{3}\times\frac{8.100}{\Omega}=\frac{4}{3}\times\frac{8.100}{\frac{\pi\times0,12^2}{4}}=\frac{4}{3}\times\frac{8.100}{11.309}=0,92\,kg.$$

Tous ces chiffres sont acceptables au point de vue de la résistance.

La fatigue dans l'arbre ne dépasse pas :

$$R=\frac{10,2}{d^3}(8.100\times0,2)=1.903\times1.620=3,08\,kg\text{ par }mm^2.$$

Les bras sont soumis à des efforts de compression qui varient avec les positions des pistons sur la poulie de renvoi; lorsque l'articulation entre deux pistons successifs se trouve dans l'axe d'un bras, cette compression a pour valeur celle calculée précédemment :

$$C=4.020\,kg\text{ en nombre rond.}$$

Et la section du bras étant de

$$2\times100\times18=3.600\,mm^2$$

l'effort de compression moyen auquel il pourra avoir à résister ne sera que de :

$$R=\frac{4.020}{3.600}=1,17\,kg.$$

Quant à la fatigue dans la jante de cette poulie, elle atteint son maximum lorsque l'articulation entre deux pistons se trouve vers le milieu de l'intervalle de deux bras.

Si nous supposons la jante encastrée à ses extrémités sur les bras, nous avons :

$$R=4.020\times0,045\times0,148\times\frac{r}{I}.$$

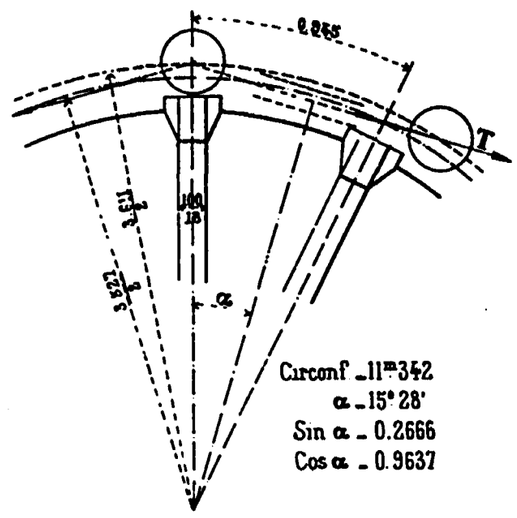


Fig. 149.

La section de la jante étant celle ci-contre :

$$r=66\,mm\quad\text{et}\quad I=\frac{2\times\overline{133}^3\times15}{12}=\frac{15\times2.299.968}{6}=5.750$$

$$R=4.020\times0,045\times0,148\times\frac{66}{5.750}=0,45\,kg.$$

Roue motrice. — Chaque bras est soumis à un effort de flexion (voir fig. 150) :

$$F=\frac{1}{8}T_m\cos\frac{\varepsilon}{2}=\frac{1}{8}T_m\cos15°=\frac{1}{8}+4.484\times0,966=538\,kg$$

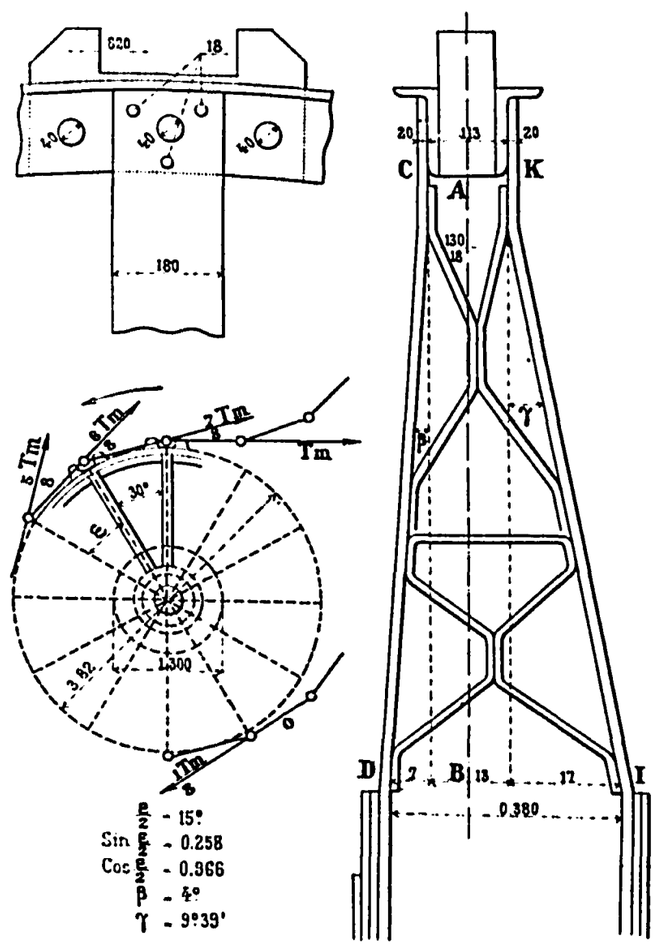


Fig. 150.

Il est soumis en outre à un effort de compression maximum :

$$C=\frac{13}{8}T_m\sin\frac{\varepsilon}{2}+138\,kg\left(\text{poids du }\frac{1}{12}\text{ du secteur}\right)$$

$$C=\frac{13}{8}\times4.484\times0,258+138=1.872+138=2.010\,kg$$

qui se décomposent suivant chacune des branches du bras en deux efforts qui comprennent pour la branche CD :

$$F_1 = \frac{F \sin\gamma}{\sin(\gamma+\beta)} = 0{,}715\,F = 0{,}715 \times 538 = 385\,kg$$

$$C_1 = \frac{C \sin\gamma}{\sin(\gamma+\beta)} = 0{,}715\,C = 0{,}715 \times 2.010 = 1.440\,kg$$

et pour la branche KI :

$$F'_1 = \frac{F \sin\beta}{\sin(\gamma+\beta)} = 0{,}292\,F = 0{,}292 \times 538 = 157\,kg$$

$$C'_1 = \frac{C \sin\beta}{\sin(\gamma+\beta)} = 0{,}292\,C = 0{,}292 \times 2.010 = 582\,kg$$

La branche la plus fatiguée a donc à résister dans sa section d'encastrement, c'est-à-dire à sa jonction avec le tourteau, à l'action d'un moment de flexion :

$$\mu = 385 \times 1{,}26 = 485$$

et à celle d'un effort de compression longitudinale :

$$N = 1.440\,kg$$

d'où une compression extrême dans les fibres égale à

$$R = \mu \frac{e}{I} = \frac{N}{\Omega} = 485 \times \frac{90 \times 12}{20 \times 18} + \frac{1.440}{180 \times 20}$$

$$R = 4{,}15 + 0{,}41 = 4{,}56\,kg.$$

Chaque mâchoire exerce sur ses boulons d'attache aux couronnes circulaires un effort de cisaillement égal à

$$F = \sqrt{\overline{538}^2 + \overline{2.010}^2} = 2.087\,kg.$$

A cette action correspond un effort de cisaillement dans chacun des boulons de 0,04 *m* au nombre de trois, qui réunissent les mâchoires aux couronnes, égal à $\frac{2.087}{6} = 348\,kg$, car ils travaillent à double section ; et un moment de flexion dans ces boulons mesuré par

$$\mu = 348 \times 0{,}0325 = 11{,}26$$

d'où l'on déduit pour tension et compression (R) des fibres et pour effort tranchant maximum (T) :

$$R = \frac{10{,}2}{\overline{0{,}01}^3} \times 11{,}26 = 1{,}8\,kg$$

$$T = \frac{4}{3} \times \frac{348}{1.256} = 0{,}38\,kg$$

Il est utile d'ajouter que les fatigues seront plus grandes au moment de la mise en marche par suite de l'inertie des masses, mais cette augmentation ne dépasse pas 10 p. 100.

Le tourteau est fixé à la roue par l'intermédiaire d'un moyeu (fig. 151) auquel

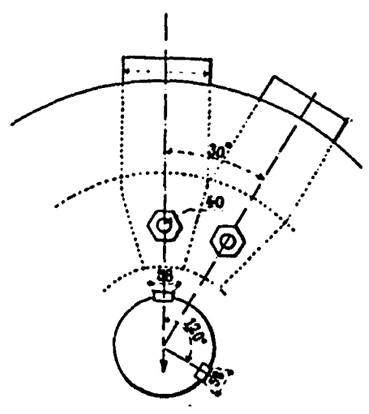


Fig. 151.

il est relié par 24 boulons de 0,04 *m*. Le partage du couple de torsion entre les deux faces du tourteau est évidemment le même que celui des forces entre les deux branches du bras.

La composante du couple, du côté CD, sera donc :

$$MT_1 = \left(4.484 \times \frac{3{,}82}{2}\right) \times 0{,}715 = 8.550 \times 0{,}715 = 6.100$$

du côté KI, elle aura au contraire pour valeur :

$$MT'_1 = 8.550 \times 0{,}292 = 2.500.$$

Le couple (côté CD) soumet chacun des 12 boulons, fixant le tourteau au moyeu, à un effort de cisaillement égal à

$$F = \frac{6.100}{12 \times 0{,}3} = 1.690\,kg$$

et à l'action d'un couple

$$\mu = 1.690 \times 0{,}025 = 42{,}1$$

d'où des tensions et compressions des fibres dans ces boulons égales à

$$R = \frac{10{,}2}{\overline{0{,}04}^3} \times 42{,}1 = 7{,}05\,kg$$

et des efforts tranchants par unité de surface égaux à :

$$T = \frac{4}{3} \times \frac{1.690}{1.256} = 1{,}82\,kg.$$

Le couple (côté KI) étant composé de forces inférieures aux précédentes, nous ne ferons pas le calcul pour les 12 boulons situés de ce côté.

Clavetage. — Le clavetage du moyeu sur l'arbre est réalisé dans les conditions du croquis ci-contre (voir fig. 152). Pour une rotation dans le sens de la flèche,

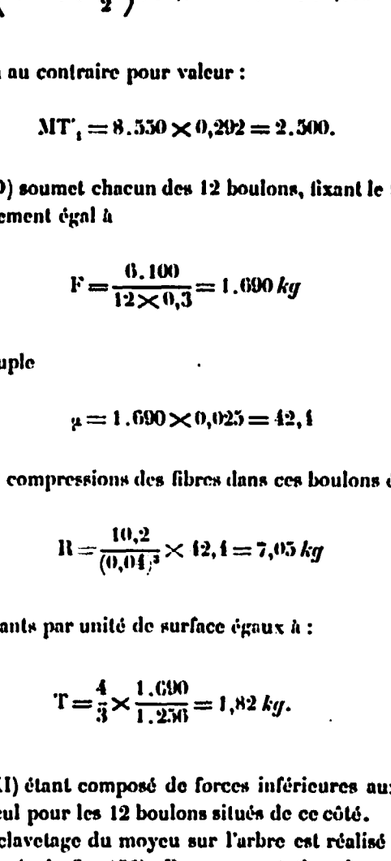


Fig. 152.

l'entraînement de l'arbre est obtenu par les pressions au contact des faces de la clavette avec l'arbre.

La pression totale à exercer au contact de ces faces pour équilibrer le couple dont la valeur est :

$$4.484 \times 1{,}91 = 8.550$$

est de : $$Q = \frac{8.550}{0{,}122} = 70.150\,kg$$

soit 23.400 *kg* par clavette en nombre rond.

Il est évident que les pressions se répartissent sur les faces de la clavette de la même manière que l'effort est transmis au moyeu, c'est-à-dire que la pression moyenne étant de :

$$R = \frac{23.400}{380 \times 15} = \frac{23.400}{5.700} = 4{,}10\,kg \text{ par } mm^2,$$

on aura du côté de CD une pression de

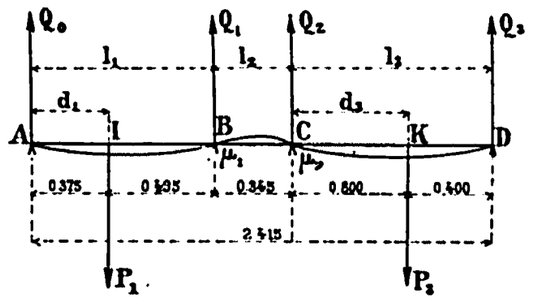
$$R' = 1{,}42 \times 4{,}10 = 5{,}83\ kg$$

et du côté KI une pression

$$R'' = 0{,}58 \times 4{,}10 = 2{,}37\ kg.$$

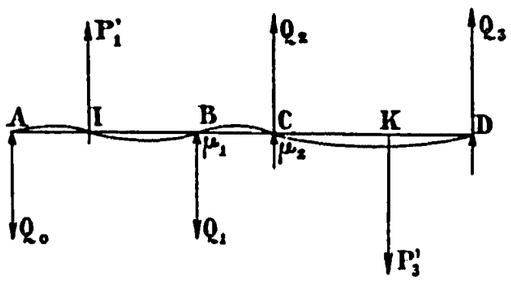
Arbre. — L'arbre est assimilable à un solide soumis, en plus des efforts de torsion et de son propre poids, à l'action d'une série de forces verticales et horizontales réparties suivant les diagrammes ci-contre (voir fig. 153).

On en déduit, en appliquant les formules de Clapeyron pour la poutre à quatre travées, les moments de flexion aux appuis intermédiaires et les réactions des quatre supports.



P - Poids de l'arbre - 350K
P'₁ - d° de la roue - 4000K
P'₂ - Charge du pignon - 1200K

d - 0.200
Ω - 31410
$\frac{10.2}{d^3}$ - 1275



Tang β - 1239
Sin β - 0.778
Cos β - 0.627
β - 51° 6'

P'₁ - 4862
P'₃ - 36000

Fig. 154.

On trouve ainsi, en considérant séparément les forces verticales et les forces horizontales :

1° Cas de l'action des forces verticales seules (voir fig. 154) :

$$\mu_1 = 425 \qquad \mu^2 = 81{,}4$$
$$Q_0 = 1.939\ kg \qquad Q_1 = 3.409\ kg$$
$$Q_2 = 81\ kg \qquad Q_3 = 638\ kg$$

2° Cas de l'action des forces horizontales seules :

$$\mu_1 = -1.049 \qquad \mu_2 = 3.894$$
$$Q_0 = -1.565\ kg \qquad Q_1 = -17.559\ kg$$
$$Q_2 = 25.147\ kg \qquad Q_3 = 13.133\ kg$$

De ces chiffres il résulte pour chacun des tourillons :

1° *Palier* A. — La résultante des efforts sur ce palier fait un angle $\beta = 51°6'$ avec l'horizontale, et sa valeur est de 2.494 *kg* (voir fig. 155).

Cette résultante donne lieu à une compression sur le coussinet :

$$N = \frac{2.494}{173 \times 200} = 0{,}072\ kg$$

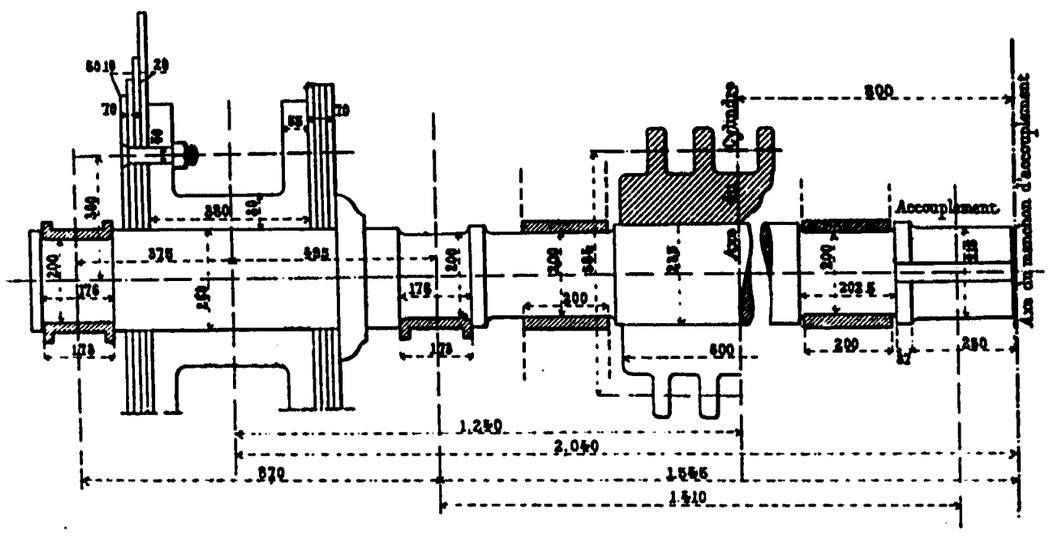


Fig. 153.

et à des tensions et des compressions dans les fibres du tourillon de :

$$R = \frac{10{,}2}{d^3}(2.494 \times 0{,}085) = 1.275 \times 212 = 0{,}27\ kg \text{ par } mm^2.$$

Le couple de frottement qui en résulte, si $f = 0{,}10$, est de

$$Mf_0 = \frac{\pi}{2}\frac{f}{\sqrt{1+f^2}} \times 2.494 \times 0{,}10 = 249{,}4 \times 0{,}0157 = 37{,}5.$$

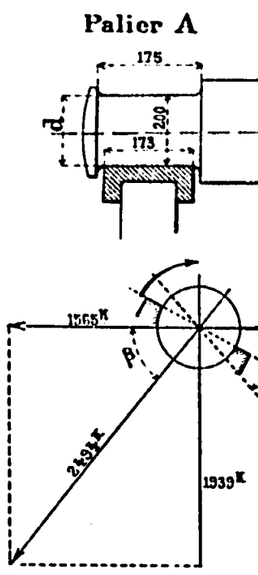
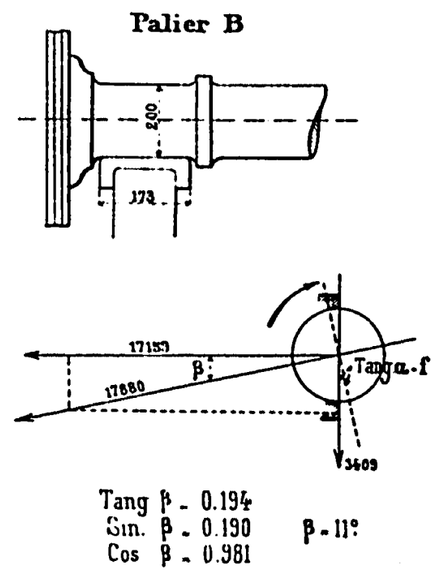


Fig. 155.



Tang β - 0.194
Sin. β - 0.190 β - 11°
Cos β - 0.981

Fig. 156.

Palier B. — En faisant la composition des forces comme ci-dessus, on trouve comme résultante : 17.880 *kg* (voir fig. 156).

Compression dans le coussinet :

$$N = \frac{17.880}{34.600} = 0{,}516.$$

Pour calculer les tensions et compressions des fibres dans le tourillon, nous tiendrons compte du moment de torsion qui s'y exerce en appliquant la formule :

$$R = \frac{16}{\pi d^3}\sqrt{(M_t)^2 + 4(\mu_1)^2}$$

Or

$$M_t = \overbrace{4.481 \times 1{,}91}^{8.550} + 37{,}5 = 8.588$$

donc

$$R = 637\sqrt{8.588^2 + 4\overline{(1.049)^2}} = 5{,}4\ kg.$$

Le couple de frottement est de :

$$M_{f_1} = 0{,}0137 \times 17.880 = 280.$$

Palier C. — La résultante des forces qui y agissent est égale à 25.150 *kg*.

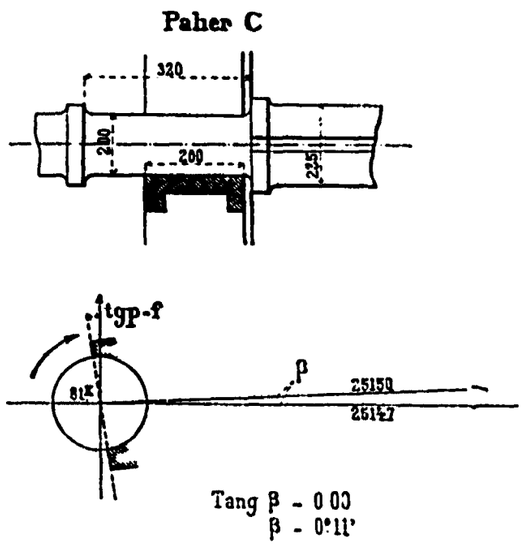


Fig. 157.

Compression dans le coussinet :

$$N = \frac{25.150}{40.000} = 0{,}628.$$

Tension et compression des fibres du tourillon :

$$R = 637\sqrt{M_{f_2}^2 + 4(\mu_2)^2}$$

$$M_2 + 8.550 + 37{,}5 + 280 = 8.868 \quad \mu_2 = 3.894$$

$$R = 637\sqrt{(8.868^2) + 4(3.894^2)} = 7{,}2\ kg$$

Le couple de frottement est de :

$$M_{f_2} = 0{,}0157 \times 25.150 = 394.$$

Palier D. — La résultante est de 13.140 *kg*.

$$N = \frac{13.140}{40.000} = 0{,}328\ kg$$

$$R = \frac{10{,}2}{d^2}(13.140 \times 101{,}25) = R = 1{,}75\ kg$$

et le couple de frottement est de

$$M_{f_3} = 13.140 \times 0{,}0157 = 206.$$

On sait par ces calculs que l'arbre se trouve dans de bonnes conditions et que, même en tenant compte des fatigues additionnelles de mise en marche, on ne trouve pas des efforts moléculaires dépassant la limite de sécurité.

Chaîne Galle. — Le pignon des chaînes Galle, calé sur l'arbre, présente un diamètre moyen de 0,584 *m* et remorque dans le mouvement ascensionnel de la cabine une portion de chaîne dont la longueur à l'origine de la course est de 11 *m* dans la gaine plus 1,25 *m* de chaîne pendante; d'où, en admettant un coefficient de frottement $f = 0{,}25$ pour la chaîne dans la gaine, et en remarquant que la chaîne est double et pèse 100 *kg* au mètre courant, l'effort nécessaire pour la faire mouvoir est :

$$F = (0{,}25 \times 2 \times 11 \times 100) + 2 \times 1{,}25 \times 100 = 800\ kg.$$

Les couples résistants dus à l'enroulement de la chaîne Galle sur le pignon sont égaux, si $f = 0{,}15$, à (voir fig. 158) :

$$\frac{\pi}{2} \times \frac{f}{\sqrt{1+f^2}}(T_1 + F)\frac{d}{2} = 0{,}0047 \times 36.000 = 170$$

La tension T_1 dans la chaîne, à l'instant où elle se déroule du pignon, est donnée par la relation :

$$T_1 \times \frac{0{,}584}{2} = 8.550 + 37{,}5 + 280 + 394 + 206 + 170 + \frac{800 \times 0{,}584}{2}$$

$$T_1 = \frac{9.638}{0{,}292} + 800 = 33.000 + 800 = 33.800\ kg$$

soit 34.000 en nombre rond.

Les chaînes Galle d'un circuit comportent deux cours de chaînes constitués chacun au moyen de séries de 8 plaquettes de 108×8, reliées entre elles par des boulons de 40 *mm* de diamètre.

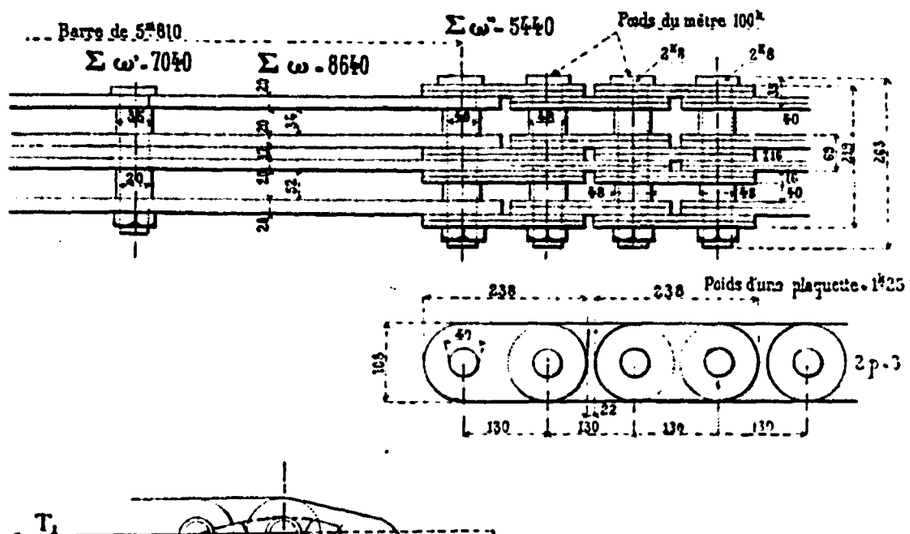
A ces dimensions répondent dans la section courante (AB) (voir fig. 158 *bis*) :

$$R = \frac{34.000}{2 \times 8 \times 108 \times 8} = \frac{34.000}{13.824} = 2{,}45\ kg$$

Et dans la section (CD) :

$$R' = \frac{34.000}{2 \times 8 \times 68 \times 8} = \frac{2.125}{68 \times 8} = \frac{2.125}{544} = 3{,}90\ kg.$$

Mais, comme l'équilibre réel ne peut exister que si la section (CD) est soumise à



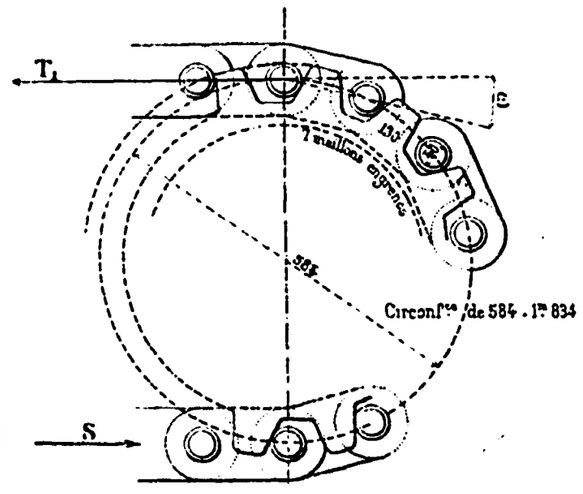


Fig. 158.

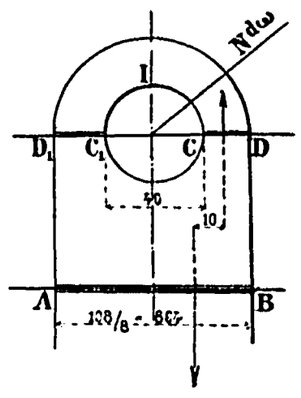


Fig. 158 *bis*.

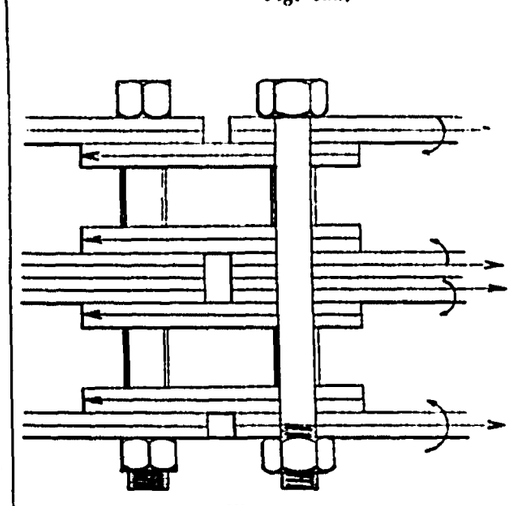


Fig. 159.

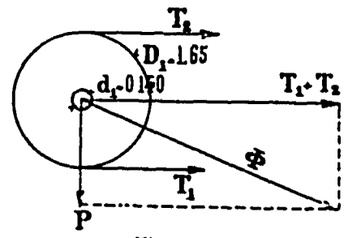


Fig. 160.

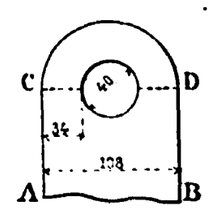


Fig. 161.

l'action d'une tension appliquée en son centre de gravité, égale à $\frac{2.125}{2}$ ou 1.063 *kg*, et à celle d'un couple $(1.063 \times 0{,}01)$, il en résulte que les efforts en CD passent en réalité par les deux valeurs extrêmes :

En (C) une tension :

$$R'_1 = \frac{v}{I}\mu + \frac{N}{\Omega} = 7{,}136 + \frac{1.063}{272} = 7{,}136 + 4{,}056 = 11{,}2\ kg$$

En (D) une compression :

$$R' = -\frac{v}{I}\mu + \frac{N}{\Omega} = -7{,}136 \times 4{,}056 = 3{,}08\ kg.$$

Les éléments de la demi-surface cylindrique (CIC_1) en contact avec le boulon subissent des compressions égales par mm^2 à

$$N = \frac{2.125}{40 \times 8} = 6{,}6\ kg.$$

Chaque série de deux plaquettes étant soumise à un effort de traction de :

$$\frac{34.000}{2\times4}=4.250\,kg$$

chaque boulon aura à résister (voir fig. 159) :

1° A un effort tranchant de 4.250 *kg*, d'où un effort moléculaire :

$$T=\frac{4}{3}\times\frac{4.250}{\Omega}=\frac{4}{3}\times\frac{4.250}{1.256}=4,4\,kg.$$

2° A l'action d'un couple ($\mu=4.250\times0,016=68$) d'où des tensions et compressions :

$$R=\frac{r}{I}\,\mu=100.000\times68=10,9\,kg.$$

La traction exercée sur le brin de la chaîne formant dormant se déduit de la relation ci-dessous que l'on résout par approximations successives en posant au début $T_2=T_1$ (voir fig. 160) :

$$T_2=T_1+F\qquad F=\Phi f\frac{D_1}{d_1}$$

$$\Phi=\sqrt{(T_1+T_2)^2+P^2)}$$

$$T_2=T_1+\left(\sqrt{(T_1+T_2)^2+P^2)}\,f\frac{d_1}{D_1}\right.$$

Si $f=0,15$

$$T_2=34.000\times\sqrt{\overline{(68.000)^2+\overline{2.000}^2}}\times0,15\times\frac{0,14}{1,05}$$

On trouve, après deux opérations, $T_2=36.370$, soit 36.500 *kg* en nombre rond, si nous tenons compte du frottement sur les glissières.

De ce chiffre, on déduit pour conditions de résistance des barres à leur attache avec les plaquettes des chaînes Galle :

Une tension moyenne dans la section (CD) (voir fig. 161) :

$$R=\frac{36.500}{2\times4\times20\times68}=\frac{36.500}{10.880}=3,35\,kg$$

et en réalité, en tenant compte du moment de flexion, une plus grande tension, laquelle peut atteindre pour les fibres contre le boulon :

$$R=3,35+\frac{r\mu}{I}=3,35+5,80=9,15\,kg.$$

Quant au boulon d'assemblage, il subit un effort de cisaillement de :

$$\frac{36.500}{8}=4.563\,kg$$

donnant lieu à une fatigue :

$$T=\frac{4}{3}\cdot\frac{4.563}{1.256}=4,8\,kg.$$

Plongeur. — Le poids du plongeur est de 5.000 *kg* en nombre rond, d'où une première résistance au mouvement contre les glissières (A) et (B) (voir fig. 162) égale à

$$2fT=2f\left(\frac{5.600}{2\cos45°}\right)=0,2\times\frac{5.600}{0,707}=1.584\,kg$$

si l'on admet f (fonte contre fer) $=0,2$.

Le presse-étoupes qui garnit l'entrée du cylindre hydraulique offre une résistance au mouvement.

Le coefficient d'utilisation dynamique de la presse hydraulique est de :

$$\varepsilon=1-\frac{2af}{r}.$$

a, longueur de garniture en pression $=0,12$
f, coefficient de frottement $=0,10$
r, rayon du piston $\frac{1,05}{2}=0,58$

Il s'ensuit :

$$\varepsilon=1-\frac{2\times0,12\times0,1}{0,53}=0,95$$

Le presse-étoupes absorbe donc 5 p. 100 de l'effort.

Or celui-ci est de :

$$34.000+36.500+1.584=72.084\,kg.$$

L'effort total est donc de :

$$72.084\times1,05=75.700\,kg$$

soit en nombre rond 76.000 *kg*.

Or, avec une pression que nous avons calculée au début et qui est de 10 *kg* par *cm*² dans le cylindre, nous avons un effort de :

$$\frac{\pi\times\overline{1,05}^2}{4}\times10=8.650\times10=86.500\,kg$$

qui est plus que suffisant pour assurer le mouvement du système et vaincre quelques résistances additionnelles dont nous n'avons pas tenu compte.

En étranglant plus ou moins l'eau à son entrée dans le cylindre, on ramènera

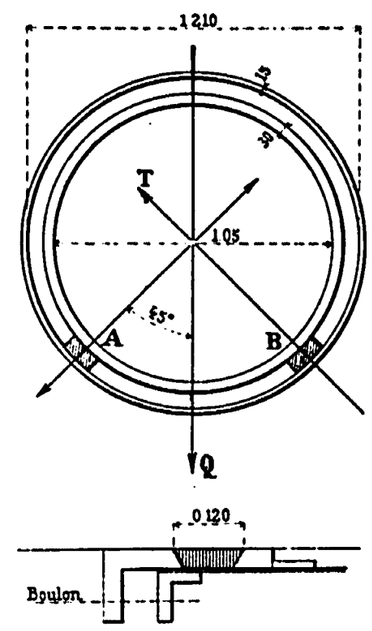


Fig. 162.

d'ailleurs très rapidement la pression à être celle qui donne l'ascension de la cabine avec une vitesse de 1 *m* à la seconde.

Cylindre. — Le cylindre est soumis à des efforts d'extension qui, d'après les formules de Lamé, ont pour valeur :

$$R=\frac{(p_0-p')\,D^2}{2(De+e^2)}-p'$$

si nous prenons $p_0=11\,kg$ par *cm*².

$$R=\frac{(110.000-10.330)\,\overline{1,21}^2}{2(1,21\times0,015+0,0225)}-10.330=4,34\,kg$$

Il y a lieu de remarquer que, le profil n'étant pas rigoureusement cylindrique, cette tension n'est qu'une moyenne entre les efforts extrêmes dans une même section.

La rivure entre deux viroles doit résister à la mise en marche à une traction totale :

$$F=110.000\left(\frac{\pi\times\overline{1,21}^2}{4}\right)=110.000\times1,150$$

$$F=126.500\,kg$$

ce qui, pour 55 rivets de 23, soumet ceux-ci à un effort sensiblement égal par *mm*² à

$$R=\frac{126.500}{55\times415}=\frac{126.500}{22.825}=5,6\,kg$$

et à des compressions au contact de la tôle et du rivet égales à

$$N=\frac{126.500}{55\times15\times23}=6,66\,kg.$$

Dans le sens parallèle à l'axe, la rivure est soumise, à raison de 29 rivets par mètre, à un effort de cisaillement de :

$$R=\frac{4,34\times15.000}{29\times415}=5,40\,kg$$

et à des compressions entre les tôles et les rivets de :

$$N=\frac{65.100}{10.005}=6,50\,kg.$$

CHAPITRE IV

ASCENSEUR VERTICAL. — SYSTÈME EDOUX

L'ascenseur destiné à transporter les voyageurs de la Tour, de la deuxième à la troisième plate-forme, est un ascenseur hydraulique vertical d'une course totale de 160,40 *m*. Il a été étudié et construit par M. Edoux, constructeur à Paris.

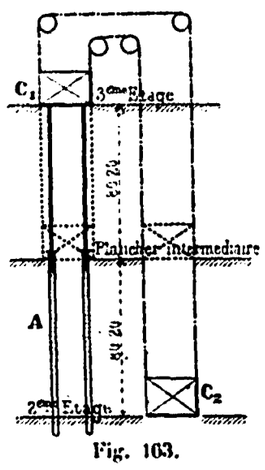


Fig. 163.

§ 1. — Principe de l'appareil.

Le principe des appareils de ce genre est connu : Un piston métallique, ayant pour hauteur celle de la distance à parcourir, se déplace dans un cylindre vertical, et porte à sa partie supérieure la cabine destinée à recevoir les voyageurs; le système ainsi constitué est équilibré par des contrepoids convenablement disposés et calculés.

Ce type d'ascenseur, en raison de la course exceptionnelle à fournir, ne pouvait s'appliquer tel quel à la Tour, et l'appareil à réaliser devait être constitué de façon qu'aucun de ses organes ne pénétrât au-dessous du niveau inférieur des ceintures du deuxième étage.

A cet effet, on a divisé la course en deux parties égales en établissant à mi-hauteur un plancher intermédiaire (voir fig. 163).

La portion de course comprise entre ce plancher intermédiaire et la troisième plate-forme (soit 80,20 *m*) est franchie en faisant, comme d'ordinaire, supporter la cabine par la tête des pistons hydrauliques, dont les deux cylindres A sont logés entre le deuxième étage et le plancher intermédiaire.

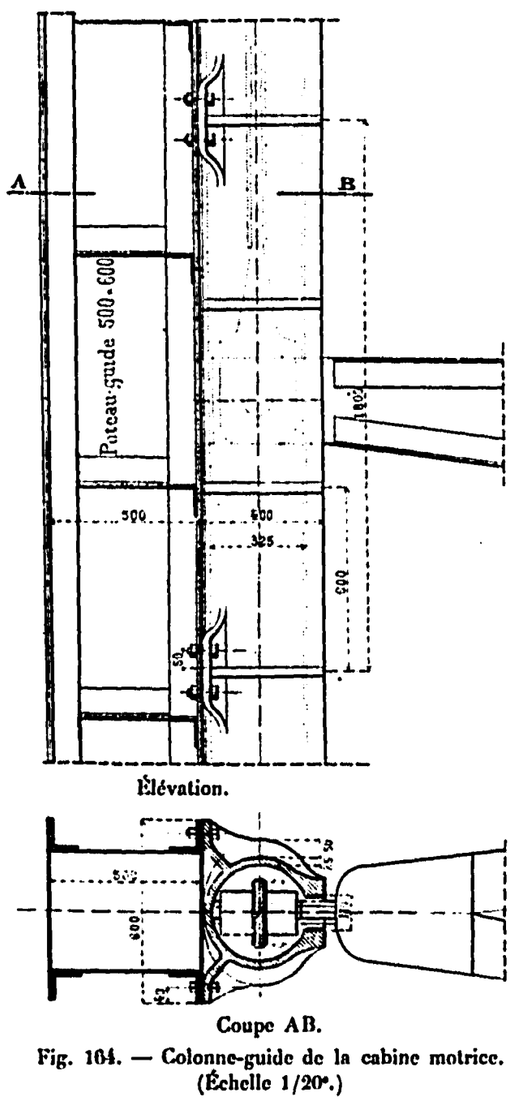


Fig. 164. — Colonne-guide de la cabine motrice. (Échelle 1/20e.)

Mais, de plus, quand l'une des cabines C_1 monte de la plate-forme intermédiaire au troisième étage, l'autre, C_2, formant contrepoids, descend de la plate-forme intermédiaire au deuxième étage et *vice versa*.

Les voyageurs changent de cabine au plancher intermédiaire, et parcourent la course totale de 160,40 *m* par le double mouvement de descente et de montée du piston. (Voir aussi le diagramme Pl. XXIII[3], fig. 1.)

Le projet avait d'abord été établi avec un piston central de 0,45 *m* de diamètre; mais on reconnut bien vite que le vent aurait sur ce piston une action des plus fâcheuses, en faisant prendre une flèche inadmissible à cette longue tige abandonnée sur une longueur de 80 *m*. La flèche aurait atteint 2,00 *m* pour les vents de 100 *kg*. Aussi, on a été conduit à dédoubler le piston, et à le remplacer par deux pistons latéraux placés en dehors du périmètre occupé par la cabine, de sorte qu'il a été possible d'entourer ces pistons d'une gaine rattachée à la charpente métallique et les soustrayant à l'action du vent

Ces gaines offrent chacune une fente longitudinale laissant passer l'assemblage de la tête du piston avec la cabine. Elles sont formées de colonnes creuses en fonte, emboîtées les unes dans les autres (voir fig. 164); elles sont boulonnées sur les poteaux-guides faisant partie de l'ossature de la Tour précédemment décrits; elles règnent sur la hauteur comprise entre le plancher intermédiaire et le troisième étage.

Des gaines analogues allant du deuxième étage à la plate-forme intermédiaire servent de guidage à la cabine contrepoids, protègent les câbles de réunion des deux cabines, et servent en même temps pour le frein parachute.

Dans la portion comprise entre la plate-forme intermédiaire et le troisième étage où sont installées les poulies de renvoi, les câbles réunissant les deux cabines sont guidés dans un léger caisson en tôle et cornières fixé à l'ossature de la Tour, qui les protège également contre l'action du vent.

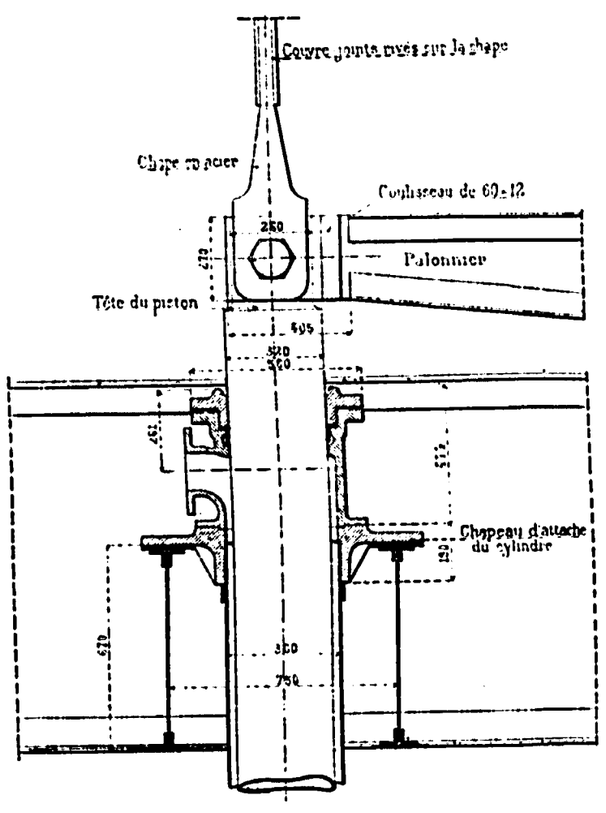
§ 2. — Description détaillée.

a) *Cylindres.* — Chacun des deux cylindres a un diamètre intérieur de 0,36 *m* et une longueur de 81,06 *m*. Ils se composent de 15 tronçons filetés de 5,273 *m* de longueur, vissés bout à bout et constitués par une tôle d'acier de 10 *mm* d'épaisseur, cintrée et rivée. Chaque tronçon se compose lui-même de quatre viroles de 1,34 *m* réunies par des couvre-joints rivés (Pl. XXIII³, fig. 14, 15, 16 et 17).

Les cylindres sont fixés à l'ossature de la Tour par un chapeau en acier coulé (*Cha.*, fig. 19 et 30 et fig. 165 du texte) reposant sur deux entretoises en fer rattachées aux poutres E. La virole supérieure est reliée à cette pièce au moyen de 22 rivets de 20 *mm* en fer de Suède.

Ils portent, en outre, une tête en fonte formant guide du piston, et recevant le cuir embouti par lequel est constitué le joint. C'est à cette tête qu'est adaptée la tubulure pour l'arrivée de l'eau.

La pression sur le fond du cylindre est au maximum de 16 *kg*, et à la partie supérieure de 8 *kg* seulement. Les cylindres ont été éprouvés à une pression de 30 *kg*. A leur partie inférieure, ces cylindres s'appuient sur deux poutrelles W et W_1, reliées par des cornières de suspension aux grandes poutres V_1 du deuxième étage. Le fond est formé par une calotte renversée représentée figure 15 (Pl. XXIII³, fig. 17 et 18).



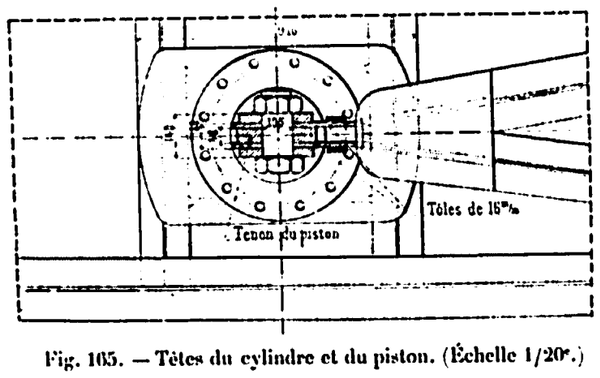


Fig. 165. — Têtes du cylindre et du piston. (Échelle 1/20e.)

b) *Pistons.* — Les pistons ont un diamètre extérieur de 0,32 *m*; leur longueur est de 81 *m*; ils sont articulés à leur sommet par une chape en acier, sur un palonnier en tôle et cornières, dont le milieu porte la cabine, par l'intermédiaire d'un axe en fer forgé de 105 *mm* (Pl. XXIII⁴, fig. 2 et 16).

Les voyageurs sont ainsi soustraits, avec ce système d'articulation, par l'intermédiaire d'un palonnier mobile, à l'influence des légères variations que l'inégalité des frottements dans les garnitures peut provoquer dans la vitesse des deux pistons.

Chacun des pistons est constitué à la partie supérieure par treize tronçons d'acier de 5,32 *m* de longueur, vissés bout à bout et formés d'une tôle de 8 *mm* d'épaisseur (Pl. XXIII⁴, fig. 5, 6 et 7). A leur partie supérieure est adaptée une tête en acier recevant l'axe qui relie le piston au palonnier.

La partie inférieure est formée de quatre tronçons de fonte d'une longueur totale de 11,80 *m* et d'une épaisseur de 31 *mm*, calculée de manière que le poids total du piston atteigne 8.250 *kg*, poids qui, avec les poids complémentaires dont il sera parlé plus loin, est nécessaire pour assurer la descente (Pl. XXIII³, fig. 3, 4 et 5).

Les pistons ayant une section totale de 1.608 cm^2, le poids d'eau déplacée pour une ascension de 1 *m* est de 160,8 *kg*, et le volume total correspondant à la course de 80,20 *m* est de 12,896 m^3.

Sur toute la hauteur de leur course, les deux pistons sont protégés par une colonne creuse en fonte

présentant une rainure pour le passage du palonnier, et munie de distance en distance de portées dressées servant de guidage, contre lesquelles pourra, le cas échéant, s'appuyer le piston (voir fig. 164).

c) *Cabines*. — Les deux cabines sont semblables et entièrement métalliques (Pl. XXIII[3], fig. 17 et 18, et Pl. XXIII[4], fig. 1 et 2); la caisse de chacune d'elles pèse 6.300 *kg*; leur hauteur est de 2,20 *m* et leur surface de 14 m^2; elles peuvent contenir chacune soixante-cinq à soixante-dix personnes.

Elles sont constituées par des tôles pleines jusqu'à 1,10 *m* au-dessus du plancher; sur le reste de la hauteur sont disposées des baies fermées par des glaces et un grillage. Les parois qui, au plancher intermédiaire, viendront en face l'une de l'autre, sont munies de deux portes roulantes pour l'entrée et la sortie des voyageurs.

Les deux cabines sont fermées en haut et en bas par un plancher formé par des poutrelles réunies par une tôle.

La cabine motrice est supportée dans le centre de son plancher par le palonnier inférieur auquel elle est articulée. Les extrémités de ce palonnier, reliées par des axes avec les pistons, reçoivent un des systèmes de câbles. Le deuxième système de câbles s'attache directement aux poutrelles supérieures (Pl. XXIII[4], fig. 2).

La cabine contrepoids est soutenue à la partie inférieure par le premier système de câbles qui s'attache directement sur les poutrelles du plancher bas, et à la partie supérieure par son articulation avec un palonnier dont les extrémités reçoivent les câbles du deuxième système (Pl. XXIII[3], fig. 17).

d) *Poulies de renvoi*. — Les quatre câbles qui relient les cabines passent au-dessus de la troisième plate-forme, sur six poulies de renvoi supportées par une poutre diagonale en treillis de 4,50 *m* de hauteur (Pl. XXIII[4], fig. 1 et 2). Ces poulies en acier ont un diamètre à la jante de 1,326 pour les unes et 1,206 pour les autres. Leur axe est de 180 *mm* (voir fig. 3 et 4).

e) *Câbles d'enroulement*. — Comme la cabine contrepoids se déplace seulement entre la deuxième plate-forme et le plancher intermédiaire, une partie seulement de la longueur des câbles passe sur les poulies de renvoi, et sert en même temps à équilibrer le déplacement d'eau des pistons. La tension que le poids de ces pistons exerce sur les câbles s'accroît, en effet, à mesure de leur sortie des cylindres, du poids de l'eau déplacée; en d'autres termes, la pression hydraulique sous les pistons diminue au fur et à mesure de leur sortie des cylindres. Elle est, par mètre, de 160,8 *kg*. Or, comme les câbles au-dessus du piston passent du côté opposé, ce qui double leur action, ces câbles, pour former un exact contrepoids, doivent peser, dans leur ensemble, 80,4 *kg* par mètre, soit 20,1 *kg* pour chacun.

Chaque câble, dans cette partie, a une largeur de 0,20 *m* et une épaisseur de 0,032 *m*; il est formé de 8 grelins de 4 aussières de 4 torons de 19 fils en acier doux de 1 *mm* de diamètre avec couture double de 3 torons de 4 fils n° 14 recuits. La résistance des fils est de 125 à 130 *kg* par mm^2. Le nombre des fils est de 2.432, donnant une section de 1.909 mm^2 correspondant à une résistance de 220.000 *kg* environ.

Le poids de chaque câble devrait, pour l'équilibre rationnel du système, être exactement de 20 *kg* par mètre courant. Il n'en a pas été tout à fait ainsi. On s'est aperçu depuis que les fils n'avaient que 0,95 *mm* de diamètre au lieu de 1 *mm*, ce qui réduisait la section à 1.751 mm^2. Le poids, au lieu d'être 20 *kg*, n'était plus que de 18,60 *kg*. Après graissage, on peut admettre un poids de 19 *kg* en service.

Quand on dut remplacer ces câbles après usure, on ne put dépasser le diamètre primitif de 0,95 *mm*, pour ne pas excéder l'épaisseur totale de 32 *mm*, à laquelle la construction obligeait à se limiter. La résistance imposée était celle de 125 à 130 *kg* après câblage correspondant à la qualité IV de Châtillon et Commentry.

Les poids résultant des longueurs commandées ont été les suivants :

Câble n° 1.	Longueur.....	91, » *m*.	Poids.....	1.684 *kg*.	Poids par mètre.....	18,505 *kg*.
— 2.	—	89,50 *m*.	—	1.653 *kg*.	—	18,469 *kg*.
— 3.	—	98,50 *m*.	—	1.790 *kg*.	—	18,172 *kg*.
— 4.	—	105,50 *m*.	—	1.929 *kg*.	—	18,284 *kg*.
Totaux.....		384,50 *m*.		7.056 *kg*.	Moyenne.....	18,400 *kg*.

Les essais de rupture ont donné les résultats suivants :

1° La résistance moyenne du métal a été de 130 *kg* pour une section de fils de 0,72 mm^2, soit 180 *kg* par mm^2. L'allongement, sur un fil d'essai de 0,50 *m* de longueur, a donné une moyenne de 1,2 à 1,6 p. 100. La moyenne des pliages faits sur chaque bout a été de 90 sur mâchoires arrondies de 10 *mm* de rayon;

2° Sur un toron de 19 fils à double enveloppe de 0,95 *mm* de diamètre, la résistance a été de 2.225 *kg*, soit 162 *kg* par mm^2;

3° Sur une aussière composée de 4 torons de 19 fils, la résistance a été de 7.850 *kg*, soit 143 *kg* par mm^2;

4° Sur un grelin formé de 4 aussières de 4 torons de 19 fils, la résistance a été de 27.980 *kg*, soit 129 *kg* par *mm*².

La perte de résistance des fils due au câblage est de 10 p. 100 sur les torons, 20 p. 100 sur les aussières, et 28 p. 100 sur les grelins.

f) *Câbles de suspension.* — La partie des câbles qui ne s'enroule pas sur les poulies supérieures, et qui est simplement destinée à la suspension de la cabine, est formée par des câbles plus légers, puisqu'ils ne sont pas destinés à faire contrepoids mobile ; ces câbles sont dits *de suspension*.

Leur largeur est la même que la précédente, soit 200 *mm*; mais leur épaisseur n'est plus que de 28 *mm* au lieu de 32 *mm*.

Ils sont formés de 12 aussières de 4 torons de 11 fils de 1,5 *mm* de diamètre, avec âme en chanvre, réunis par une couture de 2 torons de 12 fils de 2 *mm* de diamètre (4,30 *m* par mètre de câble).

Le nombre des fils est de $12\times4\times11=528$; la section d'un fil est de 1,77 *mm*² et la section totale est de 934 *mm*².

Le poids de ce câble est de 11,281 *kg* par mètre. Ce poids avait été prévu à 17 *kg*, ce qui est une seconde cause de contrariété de l'équilibrage; nous admettrons qu'en service après le graissage ce câble pèse environ 12 *kg*. Il se trouve de ce côté, en moins du poids prévu, environ $80\times5\times4=1.600$ *kg*.

g) *Mode de liaison des câbles.* — Pour décrire sommairement les diverses attaches dans leur ensemble, nous désignerons par *a* et *b* les deux câbles extérieurs par rapport à chacune des cabines, A, motrice, et B, contrepoids, et par *c* et *d* les 2 câbles intérieurs, en nous reportant au diagramme (fig. 178, p. 175).

Les premiers, *a* et *b*, sont reliés à la partie inférieure de la cabine A par l'intermédiaire du palonnier, sur les axes extrêmes duquel vient se fixer la chape mobile (Pl. XXIII⁴, fig. 16).

Le câble d'enroulement est relié par la chape de réglage (fig. 31) au câble de suspension de la cabine B.

Ce câble de suspension s'attache à la partie inférieure de la cabine B par l'intermédiaire d'un tendeur (fig. 33, 34, 38).

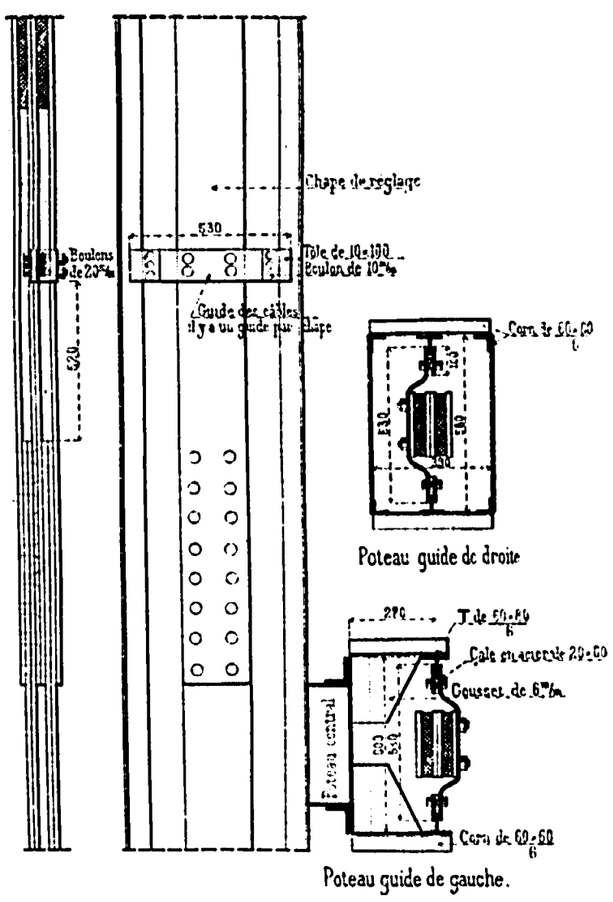


Fig. 166. — Poteaux-guides des câbles de l'étage intermédiaire au 3ᵐᵉ étage, du côté de la cabine contrepoids, et guides des chapes de réglage.

Les seconds, *c* et *d*, sont reliés à la partie supérieure de la cabine A par des tendeurs qui ne diffèrent des premiers que par l'attache (fig. 32, 33, 34), et à la partie supérieure de la cabine B par une chape mobile liée au palonnier, laquelle a besoin d'une bien moindre résistance que son analogue sur la cabine A. Elle est représentée planche XXIII^ter, figure 29.

Les chapes mobiles formant attache sur les palonniers sont en acier, et sont rivées sur des plaques d'assemblage en fer forgé de 210×15 *mm*, lesquelles sont elles-mêmes rivées au câble par des rivets de 10 *mm* de diamètre passant à travers celui-ci. Le nombre de ces rivets est de 64 pour la cabine motrice et de 48 pour la cabine contrepoids.

L'extrémité du câble reliée directement à la cabine s'y attache par un tendeur qui porte une plaque dans laquelle est ménagée une mortaise de 160×30 *mm*. Dans cette mortaise s'engage un tenon formé par le prolongement de l'âme de la poutre de la cabine. Ce prolongement est renforcé par des doublures maintenues par de solides équerres (Pl. XXIII⁴, fig. 33, 34 et fig. 179, p. 191).

La chape de réglage qui relie les deux parties d'épaisseurs différentes des câbles d'enroulement et de suspension est formée par 4 fers de 210×15, de 4,90 *m* de longueur (Pl. XXIII⁴, fig. 31), reliés deux à deux par 16 boulons de 18 *mm* à tête fraisée. Ces chapes, quoique venant à peu près au contact, laissent leur mobilité à chacun des systèmes de câbles.

Le guidage de cet assemblage dans l'intérieur des poteaux-guides des câbles est assuré par un coulisseau fixé sur cette chape (voir fig. 166).

Nous donnons ci-dessous, en raison de son importance dans l'équilibrage, le calcul détaillé de la

répartition du poids des câbles et de leurs chapes, en nous servant de la figure 178, dans laquelle sont résumées les dimensions générales de l'appareil.

Considérons d'abord le cas où, le piston étant à l'origine de sa course, les deux cabines sont à la hauteur du plancher intermédiaire, en faisant abstraction des longueurs de câble reposant sur les poulies supérieures à partir du niveau de leurs axes.

	Côté A.	Côté B.
	kg.	*kg.*
1° *Câble a.*		
Chape mobile d'attache sur le palonnier (fig. 16).....	185	
Câble d'enroulement (80,20+8,20)=88,40 à 19 *kg*.....	1.680	
Tendeur (piston fig. 33, 80 *kg*. Chape fig. 38, 65 *kg*).....		145
Câble de suspension [80,20—(1,13+0,25)]=78,82 à 12 *kg*.		946
Chape de réglage.....		285
Câble d'enroulement dépassant les poulies (8,60—2,25) à 19 *kg*.....		121
Total pour le câble *a*.....	1.865	1.497
2° *Câble b* (semblable au câble *a*, sauf la hauteur des poulies : 5,50 *m* au lieu de 8,60 *m*).		
Chape mobile d'attache sur le palonnier.....	185	
Câble d'enroulement (80,20+5,10)=85,30 *m* à 19 *kg*.....	1.620	
Tendeurs, câble de suspension, chapes diverses.....		1.376
Câble d'enroulement dépassant les poulies (5,20—2,25) à 19 *kg*.....		61
Total pour le câble *b*.....	1,805	1.437
3° *Câble c.*		
Tendeur avec chape.....	145	
Câble d'enroulement (80,20+3,69)=83,89 à 19 *kg*.....	1.594	
Chape mobile d'attache sur le palonnier B (fig. 29).....		145
Câble de suspension (80,20+1,55—2,83)=78,92 à 12 *kg*.....		947
Chape de réglage.....		285
Câble d'enroulement dépassant les poulies (7,20—4,05) =3,15 *m*.....		60
Total pour le câble *c*.....	1.739	1.437
4° *Câble d* (semblable au câble *c*, sauf la hauteur de la poulie : 6,90 au lieu de 7,20 *m*).		
Tendeur avec chape.....	145	
Câble d'enroulement (80,20+3,39)=83,59 à 19 *kg*.....	1.588	
Chapes diverses et câble de suspension.....		1.377
Câble d'enroulement dépassant les poulies (6,90—4,05) à 19 *kg*.....		54
Total pour le câble *d*.....	1.733	1.431
Total pour les câbles *a*, *b*, *c*, *d*, à l'origine de la course.....	7.142	5.802
A la fin de la course, 80,20×4×19=6.095 *kg* sont passés de l'un à l'autre côté, et il reste comme poids des câbles :		
Total à la fin de la course.....	1.047	11.897

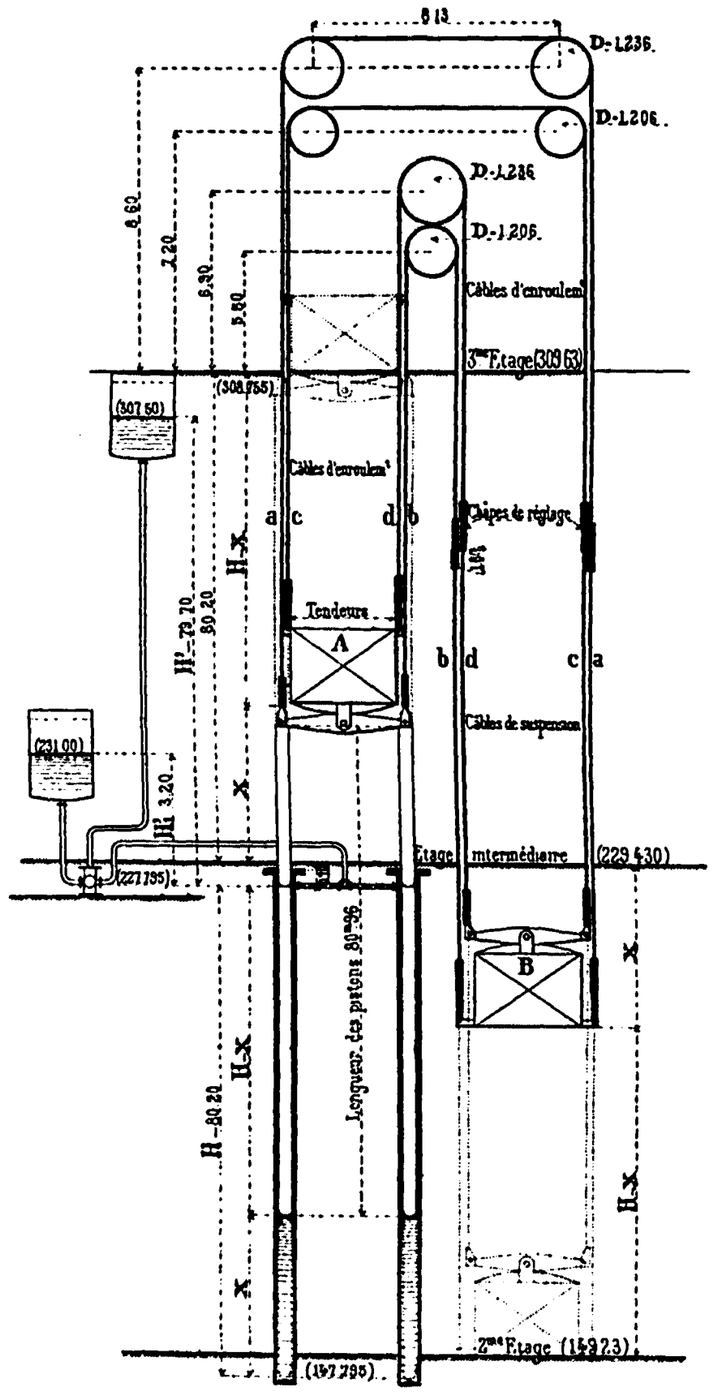


Fig. 178. — Diagramme de l'ascenseur Edoux.

Cette surcharge du côté A doit s'ajouter au poids du piston. Pour une position intermédiaire et une levée x du piston, le poids du côté A est $7.142-4\times19\,x=7.142-76\,x$, et du côté B $5.802+76\,x$ (1).

La partie de câble d'enroulement reposant sur les poulies supérieures est de $10,22+10,03+2,09+1,90=24,24\,m$ à $19\ kg=460\ kg$.

Le poids total des câbles et de leurs chapes est ainsi de $460+7.142+5.802=13.404\ kg$. Ce poids comprend :

Câbles d'enroulement.....	7.238 *kg*
Câbles de suspension.....	3.786 *kg*
Chapes.....	2.380 *kg*
Total.....	13.404 *kg*

(1) Si le câble d'enroulement avait son poids normal de 20,1 *kg*, un calcul semblable au précédent donnerait, pour le poids des 4 câbles *a*, *b*, *c*, *d*, du côté A : 7.517 *kg* ; et du côté B : 5.818 *kg* à l'origine de la course, ce qui donnerait lieu à une surcharge de 1.699 *kg* du côté A.

Pour une position quelconque, on aurait pour le côté A : $7.517-80,4\,x$; et pour le côté B : $5.818+80,4\,x$; et à la fin de la course, du côté A : $7.517-6.448=1.069$, du côté B : $5.818+6.448=12.266$.

Les différences sont assez faibles ; elles donnent en moins par rapport à ce que l'on devrait avoir : à l'origine de la course : côté A, 375 *kg* ; côté B, 16 *kg* ; à la fin de la course : côté A, 22 *kg*, côté B, 369 *kg*. Cependant, pour un appareil en balance, elles sont sensibles.

L'ensemble de l'appareil que nous venons de décrire présente une grande sécurité, non seulement en raison de son principe consistant en une cabine portée par un piston plongeur, mais aussi par les dimensions des câbles, auxquelles on a été conduit pour faire les contrepoids nécessaires. De plus, les attaches de ces câbles ont été calculées en supposant que deux seulement des câbles sur quatre portaient la charge totale, et en n'admettant que de très faibles coefficients de travail.

h) ***Frein hélicoïdal.***— Malgré le grand degré de sécurité dont nous venons de parler, nous avons tenu cependant, en plus des dispositions projetées par le constructeur, à prévoir le cas de la rupture des câbles ou de leurs attaches, laquelle amènerait la chute de la cabine contrepoids. Aussi nous avons muni cette dernière du frein hélicoïdal, système Backmann, qui présente la disposition suivante, réalisée suivant le projet de M. Guyenet, ingénieur.

A la partie inférieure, la cabine porte extérieurement un arbre vertical concentrique à la colonne de guidage correspondante. Cet arbre porte un fuseau tournant fou sur celui-ci, et muni sur son pourtour d'une spire de vis à filet carré, se déplaçant sur des spires de même pas portées par la colonne de guidage, laquelle forme écrou pour ce fuseau.

Quand la cabine descend à la vitesse normale, le fuseau est appliqué sur les spires de la colonne par son poids propre, et se déplace en tournant comme une vis dans son écrou.

Si, par suite d'une rupture des câbles d'attache, le mouvement de descente de la cabine s'accélère considérablement, un cône porté par celle-ci vient coiffer la partie supérieure du fuseau; ce dernier, en effet, ne peut prendre que la vitesse normale correspondant à l'inclinaison des spires, et se trouve de ce fait bientôt rejoint par la cabine portant le cône.

Il se produit alors entre les deux cônes un frottement énergique qui empêche bientôt le fuseau de tourner, de sorte qu'en fin de compte la cabine reste suspendue sur les spires des colonnes de guidage.

Afin d'éviter que cet arrêt soit trop brusque, et que les spires elles-mêmes courent risque d'être brisées, on a interposé dans le corps du fuseau des rondelles Belleville formant ressort. Les figures 17 et 22 de la planche XXIII[3] indiquent la réalisation de ce principe.

Le fuseau est séparé en deux parties : l'inférieure porte en saillie le filet hélicoïdal; elle est clavetée sur un arbre dont la rotation s'effectue à la partie supérieure dans une douille, et à la partie inférieure dans une crapaudine munie d'un grain en acier; la partie supérieure, qui s'emboîte dans la première et qui repose sur des rondelles Belleville, est tournée en tronc de cône à sa partie supérieure, et peut glisser le long d'un double clavetage porté par l'autre partie du fuseau, de manière à venir comprimer les rondelles Belleville (voir Pl. XXIII[3], coupes fig. 26, 27 et 28.)

Ces fuseaux sont placés aux extrémités de la poutre inférieure du bâti du parachute, lequel est suspendu aux poutres du plancher de la cabine contrepoids (Pl. XXIII[3], fig. 17, 24 et 25 et 8 à 13). Ce bâti se compose de poutres en tôle et cornières réunies par un treillis; leur écartement est tel que les crapaudines des fuseaux sont placées aux extrémités de la poutre inférieure et les douilles à celles de la poutre supérieure. Une passerelle de 0,50 *m* de largeur, suspendue au-dessous, permet la visite et l'entretien des fuseaux. Ceux-ci, pour descendre librement et rapidement le long des spires, ont besoin d'être lubrifiés constamment; on y a pourvu par un ensemble de dispositions représentées figures 9, 10 et 21 à 27, et spécialement pour les coulisseaux de guidage, les figures 28 et 29 de la planche XXIII[4].

Pour faciliter ces opérations de visite et d'entretien, on a installé au-dessous des colonnes de guidage un plancher représenté fig. 17 et 18 de la planche XXIII[3] et fig. 8 de la planche XXIII[4], suspendu par des cornières aux poulies O et P de l'ossature.

Le poids de cette armature et du parachute lui-même, qui n'a pas son similaire du côté de la cabine motrice, est équilibré par un contrepoids spécial placé sur celle-ci et formé par un plancher en tôle de 18 *mm* d'épaisseur. Le poids de l'appareil du frein, ainsi que celui de la tôle, est de 1.950 *kg*.

Les colonnes de guidage portent à l'intérieur deux filets hélicoïdaux destinés à produire la rotation des fuseaux, l'un à la montée, l'autre à la descente, et qui sont représentés planche XXIII[3], fig. 22. Ce dernier est beaucoup plus robuste, car il doit pouvoir supporter éventuellement le poids de la cabine sur une seule spire.

En résumé, le fonctionnement de ce parachute hélicoïdal a lieu comme suit :

Pendant la marche normale, le fuseau repose par son arbre sur le grain inférieur, le ressort (rondelles Belleville) est complètement détendu, les cônes à emboîtement sont éloignés l'un de l'autre. A la descente,

le contact hélicoïdal se produit en dessus, le poids du fuseau détermine sur le filet incliné une composante qui le fait tourner à gauche de telle sorte qu'il descend comme la cabine; il peut faire 200 tours à la minute.

Pendant la montée, le contact hélicoïdal se produit en dessous, la force ascensionnelle détermine sur le filet incliné de la colonne une composante qui fait tourner le fuseau à droite, de telle sorte qu'il suit le mouvement ascensionnel de la cabine.

Dans le cas de rupture des câbles, le contact hélicoïdal se ferait immédiatement en dessus du filet de la colonne; la puissance vive et la vitesse de la cabine augmentant instantanément dans une grande proportion, la cabine glisserait sur les extrémités de l'arbre du fuseau, qui ne peut suivre ce mouvement accidentel; alors les cônes se rapprocheraient en se coinçant; les rondelles Belleville amortiraient le choc, et le fuseau ainsi que la cabine seraient presque immédiatement arrêtés.

i) Conduites et Distributeurs. — L'eau sous pression provient d'un réservoir placé sous le plancher du 3^me^ étage de la tour. Son diamètre est de 3,00 *m*, sa hauteur de 4,20 *m* mesurée au-dessus du fond sphérique; son cube est d'environ 30 m^3, soit un peu plus de deux fois l'eau consommée par une course. La hauteur moyenne de l'eau dans le réservoir est à 79,50 *m* au-dessus des distributeurs et de la partie inférieure du piston plongeur, quand celui-ci est en haut de sa course. C'est la hauteur de chute dont on dispose pour le fonctionnement (Pl. XXIII^4^, fig. 1, 2 et 17). L'eau d'évacuation se rend dans un réservoir placé sur la plate-forme intermédiaire et semblable au premier (Pl. XXIII^3^, fig. 19 et 20). Il reçoit l'eau qui est refoulée par les plongeurs pendant la descente. Cette eau est renvoyée par une conduite spéciale aux pompes Worthington placées dans le sous-sol de la pile 3. Celles-ci sont ainsi alimentées par de l'eau ayant une pression de 231 — 31,50 = 199,50 *m*. L'eau devant être montée à la cote moyenne de 307,50 *m*, soit à 276 *m* au-dessus des pompes, celles-ci n'ont plus à produire qu'un travail de refoulement de 276 — 199,50 = 76,50 *m*, pertes de charge non comprises.

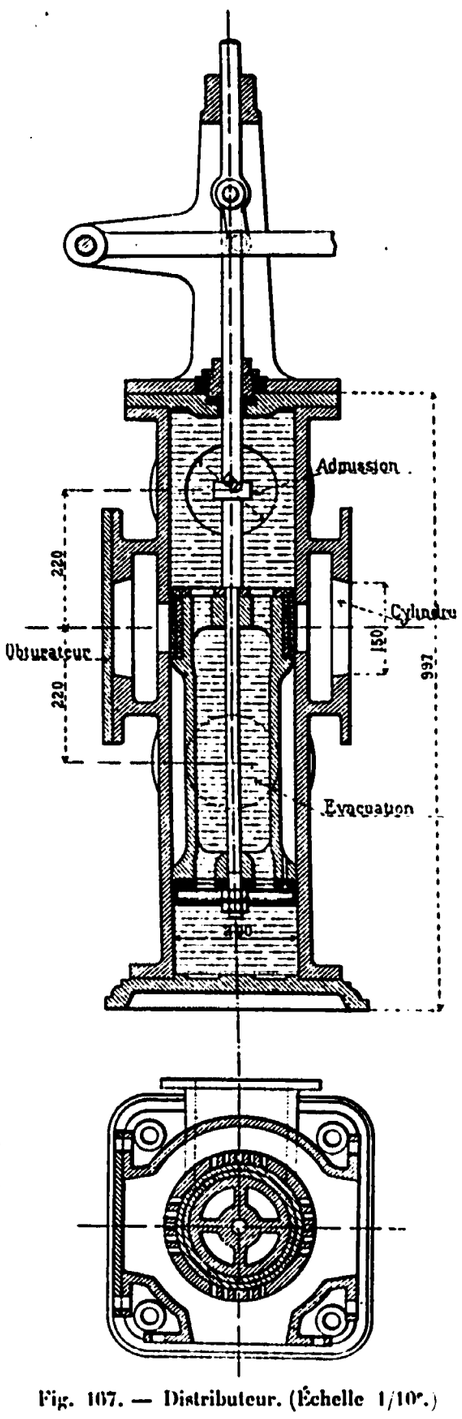


Fig. 167. — Distributeur. (Échelle 1/10^e^.)

Les deux cylindres sont alimentés par le même conduit (fig. 19 et 20) afin que les admissions soient égales. Le constructeur avait d'abord installé un seul distributeur, mais il fut reconnu qu'il était absolument insuffisant au point de vue des vitesses à réaliser d'après les contrats. On dut, pendant l'exploitation, en installer un second qui améliora la situation. Il existe donc deux distributeurs D accouplés, exactement semblables, dont les conduites se raccordent par une culotte en forme de v, sur la partie médiane du tuyau de communication des deux cylindres. Ce dédoublement a exigé un tuyautage assez compliqué, chaque distributeur étant en relation (voir fig. 19) :

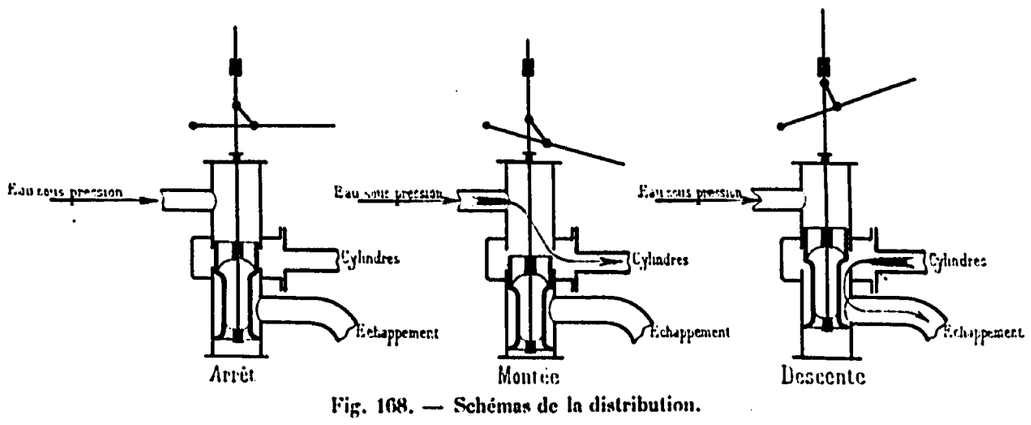


Fig. 168. — Schémas de la distribution.

1° Avec la conduite T_1, descendant du réservoir du troisième étage (diamètre 0,20 *m*).

2° Avec le tuyau de communication des deux cylindres (diamètre 0,15).

3° Avec le réservoir R_2 de décharge de l'étage intermédiaire, par les conduites *t* (diamètre 0,15).

Chaque distributeur (Pl. XXIII^ter^, fig. 21 et 23, et fig. 167) est constitué par un piston creux équilibré qui se déplace verticalement dans un cylindre portant trois tubulures.

La première, placée à la partie supérieure, correspond à l'admission d'eau sous pression.

La deuxième, à la partie médiane, donne la communication avec les cylindres de l'ascenseur.

La troisième, à la base, correspond à l'évacuation.

Les schémas ci-contre (voir fig. 168) indiquent les positions du piston correspondant à la montée, l'arrêt et la descente de la cabine motrice.

L'eau pénètre dans le cylindre par vingt ouvertures rectangulaires ayant 80 *mm* de hauteur sur 10 *mm* de largeur réparties sur le pourtour du cylindre et donnant une section d'écoulement de 160 cm^2 (voir fig. 167).

Les distributeurs, ainsi que tout le tuyautage de l'ascenseur, sont placés au-dessous du plancher intermédiaire.

La commande est faite par un câble à deux brins qui règne sur toute la hauteur de la course de la première cabine. L'un des brins b_1 (fig. 169) porte à sa partie inférieure une crémaillère C, l'autre b_2 porte un contrepoids P équilibrant le système.

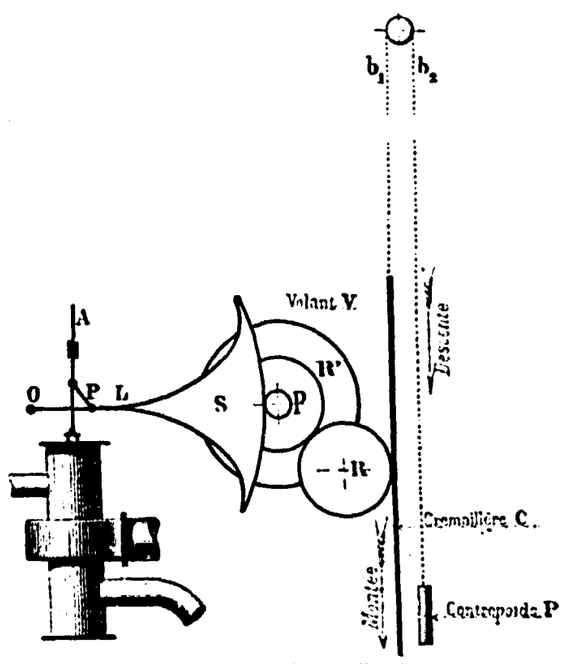


Fig. 169. — Commande des distributeurs.

Suivant que l'on opérera une traction sur b_1 ou sur b_2, on obtiendra la montée ou la descente.

Afin d'éviter les coups de bélier, on s'est attaché à rendre très lents les mouvements du distributeur au moyen du dispositif suivant :

La crémaillère C, dans son mouvement, fait tourner une première roue dentée R, laquelle engrène avec une deuxième roue R' calée sur un arbre portant deux pignons semblables *p*; chacun de ces pignons commande un distributeur par l'intermédiaire d'un secteur denté S, oscillant autour d'un axe O, qui, par l'intermédiaire d'une biellette P, élève ou abaisse la tige A du distributeur.

Le volant V permet au machiniste placé près des distributeurs de produire le mouvement complet de ceux-ci, quand il a commencé à se produire par la main du conducteur de la cabine. Ce dernier mettrait en effet trop de temps à le produire tout seul; car le déplacement de la crémaillère est de 2,50 *m*.

Le machiniste est placé dans un abri vitré représenté figure 19 et auquel on accède par une chambre-abri placée au-dessus (Pl. XXIII^{4}, fig 11 à 15).

§ 3. — Fonctionnement et manœuvre.

Considérons les cabines à l'arrêt, l'une au 3^{me} étage, l'autre au 2^{me}; la crémaillère C est dans la position de la figure, les axes des secteurs sont horizontaux, les pistons des distributeurs sont dans la position indiquée par l'arrêt; l'appareil, en un mot, est au point mort. Le signal de la mise en marche est donné au 2^{me} étage par un coup de sifflet; le conducteur de la cabine contrepoids avertit par une sonnerie électrique le conducteur de l'autre cabine qu'il est prêt à partir; de plus, la palette verticale d'un avertisseur électrique tombe horizontalement et indique sûrement que le signal vient du 2^{me}. Les portes des cabines étant fermées, le conducteur du 3^{me} étage tire sur le câble b_2 du contrepoids P; le mécanicien de l'étage intermédiaire, averti par le bruit de l'eau dans les tuyaux, continue à l'aide du volant V le relèvement de la crémaillère. La crémaillère en se relevant fait tourner les roues dentées R et R', les pignons *p* relèvent les secteurs dentés S, lesquels élèvent les pistons des distributeurs et les amènent dans la position de la descente. Il y a alors communication entre les cylindres de l'ascenseur et le réservoir de décharge; la cabine supérieure et les pistons qui y sont reliés peuvent donc s'abaisser, entraînant l'élévation de la cabine inférieure. En descendant, la cabine supérieure frappe au moyen d'un taquet à ressort sur un levier qui remet verticale la palette de l'avertisseur électrique. Les pistons de l'ascenseur en descendant chassent l'eau des cylindres dans le réservoir intermédiaire où elle s'accumule. Avant d'arriver à l'étage intermédiaire, la cabine supérieure est ralentie par le mécanicien qui manœuvre le volant V de manière à ramener progressivement les secteurs au point mort; il est averti du moment où il doit commencer cette manœuvre par l'arrivée même de la cabine supérieure à une dizaine de mètres du plancher; d'ailleurs, une pince d'arrêt fixée sur le câble de la crémaillère produit automatiquement l'arrêt, si le mécanicien est distrait.

Les cabines étant arrêtées à l'étage intermédiaire, les voyageurs changent de cabine, un coup de sifflet du conducteur de la cabine inférieure donne le signal du départ; le conducteur de la cabine supérieure tire le câble b_1 de la crémaillère; le mécanicien achève avec le volant V l'abaissement de la crémaillère; celle-ci transmet son mouvement aux roues dentées, aux pignons, aux secteurs et aux pistons des distributeurs qui prennent la position de la montée. Les cylindres des ascenseurs communiquent alors avec le réservoir du 3^{me} étage, pendant que les pompes continuent à fonctionner; sous la pression, les pistons remontent avec la cabine qu'ils portent; la cabine inférieure descend par son poids. Avant d'arriver au 3^{me} étage, la cabine est ralentie par le mécanicien qui amène progressivement les secteurs au point mort. Il est guidé dans cette manœuvre par une bande de peinture blanche faite sur la chape de réglage des câbles et une autre bande faite sur la gaine des pistons, à 3,50 *m* du plancher. A l'arrêt complet, les bandes sont de niveau. Le ralentissement commence lorsque la chape apparaît à 10 *m* environ de la bande de la gaine. Un taquet remonté par la cabine donnerait d'ailleurs automatiquement l'arrêt.

Dans l'intérieur de la cabine motrice et sous la main du conducteur se trouvent deux pinces (voir Pl. XXIII^{s}, fig. 1 et 2) qui servent à accélérer ou à ralentir l'allure, soit à la montée, soit à la descente. En agissant, par exemple, sur la pince de gauche pour la relever, on prend le câble b_2 (fig. 169) entre une came fixée à la manette de la pince et une pièce fixe de la cabine, de sorte que si la cabine descend ou monte, la crémaillère monte ou descend, et l'allure augmente. Arrivé à fin de course, on relève la pince de droite qui agit sur le câble b_1 en sens inverse de la pince de gauche, et par suite la crémaillère produit le ralentissement de la cabine. L'arrêt peut être obtenu en laissant la pince de droite relevée. Ces appareils ne peuvent pas servir pour la mise en marche. Ils ne fonctionnent que si l'ascenseur est en mouvement.

Des indicateurs de niveau d'eau électriques sont installés au 3^{me} étage, à l'étage intermédiaire et au sous-sol des pompes. Ils permettent ainsi de se rendre compte du niveau de l'eau dans les deux réservoirs. Des téléphones complètent les renseignements en cas de besoin.

Tous les huit jours, les pertes d'eau sont remplacées. A cet effet, dans le sous-sol, un tuyau est branché sur la conduite qui descend des réservoirs cylindriques du 2^{me} étage jusqu'au sous-sol et permet d'amener aux pompes Worthington de l'eau qu'elles peuvent refouler facilement jusqu'au réservoir du 3^{me} étage, grâce à la chute de cette eau du 2^{me} étage au sous-sol.

Des robinets vannes disposés sur les conduites permettent de n'employer qu'un seul distributeur, quand il n'y a pas affluence de visiteurs; dans ce cas, une seule pompe Worthington suffit.

§ 4. — Montage.

Le montage de l'ascenseur a été fait par les monteurs de la maison Edoux. La mise en place des cylindres et des pistons a présenté quelques particularités intéressantes, que nous résumerons d'après une note publiée par l'ingénieur de cette maison (voir le *Génie civil* du 20 avril 1889).

a) *Cylindres.* — Comme il était prévu qu'en fonctionnement normal, chacun des cylindres était suspendu par sa tête aux poutres du plancher intermédiaire sur lesquelles devait se reporter la plus grande partie des charges, on jugea préférable de les mettre en place en les descendant à partir du plancher, par un procédé analogue à celui employé dans les travaux de forage pour descendre les tiges de sonde.

Cette opération ne présentait du reste aucune difficulté. La manœuvre de descente était faite par un palan différentiel de 10 tonnes, suspendu à une moise reliant le poteau central au guide opposé et situé à 28,60 *m* au-dessus du plancher intermédiaire. Cette grande hauteur était nécessitée par cette circonstance que le plancher intermédiaire était occupé entièrement par les appareils de levage des matériaux de la partie supérieure de la Tour, de sorte que le chantier de montage des cylindres dut être relevé en conséquence. Il était constitué par deux planchers distincts situés aux deux étages placés au-dessus de l'intermédiaire; le premier, à 12 *m* environ, servait de plancher de vissage; le second, à 8,60 *m* au-dessus, servait à la manœuvre du palan.

On commençait par descendre le bout de fond et on l'arrêtait au-dessus du plancher de vissage, par un collier en fer venant s'appliquer sous le couvre-joint supérieur, et le maintenant suspendu (voir fig. 170).

Le palan pouvait alors amener un second tronçon au-dessus du premier; pour l'y suspendre, on utilisait le filetage de l'emboîtement femelle qui termine, à sa partie supérieure, chaque tronçon.

La pièce de suspension consiste en une grande pincette A (voir fig. 171) en fer carré et aplati à la forge aux extrémités pour recevoir deux demi-cercles en fer forgé F et F' filetés extérieurement au même pas que le cylindre. Un boulon de rappel B à quatre écrous permet, en les tournant dans un sens ou dans l'autre, de rapprocher ou d'éloigner les deux branches de la pincette; l'élasticité de cette dernière est suffisante pour permettre une variation de 10 *mm*. Pour saisir un tronçon du cylindre, la pince étant suspendue au palan, on engage dans l'emboîtement femelle les deux branches que l'on a préalablement rapprochées, puis on les écarte en faisant jouer les écrous, en ayant soin que les filets de la pince pénètrent dans ceux du cylindre; lorsque les filets sont bien pris, on les engage à fond les uns dans les autres à l'aide de deux coins C en acier.

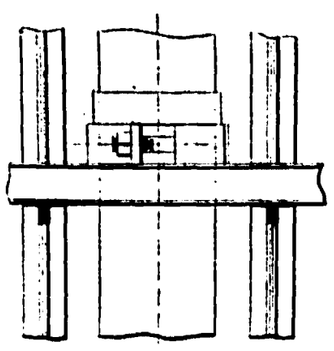


Fig. 170. — Collier supportant les cylindres.

On mettait alors les filets des deux tronçons en prise, et on en achevait le vissage à l'aide d'un collier spécial. Le levier agissant sur le collier devait être démontable, parce que la présence des poteaux-guides tangents aux cylindres ne permettait pas d'effectuer le tour complet. Aussi, ce collier, formé par deux demi-cercles en fer à simple T articulés à une extrémité et réunis à l'autre par une bride boulonnée (voir fig. 172), portait deux oreilles en acier dans lesquelles s'engageait le levier coudé. L'entraînement du tronçon à visser était obtenu par la butée du collier contre le couvre-joint longitudinal extérieur que porte le cylindre. Le joint est constitué par une rondelle en caoutchouc que l'on engage dans un drageoir ménagé dans le bout fileté mâle.

Une fois le vissage opéré, on enlève le collier de support, on descend la colonne de cylindre jusqu'à ce que celle-ci vienne au niveau du plancher de vissage, où elle vient s'appuyer sur le collier de support remis en place. On soulage la charge du plancher de vissage en soutenant la colonne par un second collier disposé sur le plancher intermédiaire. Ce collier (voir fig. 173) est constitué par deux fers plats P, dont les extrémités C viennent buter contre les fers du plancher pour s'opposer à l'entraînement lors du vissage.

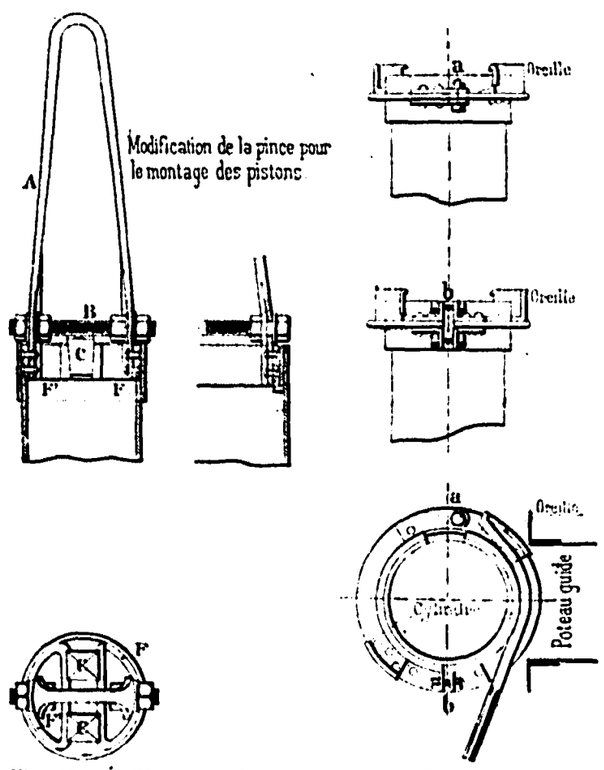


Fig. 171. — Pince pour le montage des cylindres.

Fig. 172.

Lorsque le dernier tronçon de tête est vissé, on laisse descendre le cylindre complet jusqu'au plancher intermédiaire, entre les poutres qui le supporteront d'une façon définitive, et on met en place la tête en fonte, ce qui termine le montage du cylindre.

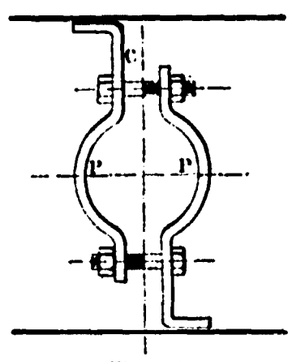


Fig. 173.

b) *Pistons.* — On opère pour ceux-ci de la même façon que pour les cylindres. La pincette A est modifiée en raison de la disposition du filetage. Comme la surface extérieure doit être parfaitement lisse, le filetage est pris sur une bague rivée à l'intérieur du cylindre, et c'est au-dessous de cette bague que viennent s'appuyer les cercles en fer forgé portées par la pincette (voir fig. 171).

Pour les pistons en fonte qui terminent la partie en tôle, la bague n'existant pas, on se sert d'une pince spéciale (voir fig. 174). La chape supérieure porte deux flasques réunies à leur partie inférieure par une butée rivée, sur laquelle vient s'appuyer un coin mobile manœuvré par deux cordes. On engage l'appareil dans le cylindre en maintenant le coin debout à l'aide des cordes, puis on le laisse retomber pour qu'il se place horizontalement et vienne buter contre les saillies intérieures de la fonte.

Pour le vissage des tronçons, on a employé un collier en fer plat à douves en bois (voir fig. 175) munies de toiles à émeri pour déterminer un serrage plus énergique. Il porte deux gâches rivées dans lesquelles s'engage le levier de manœuvre.

Pour empêcher la partie inférieure de tourner pendant le vissage, on l'a maintenue par un collier analogue (voir fig. 176), dont les branches prolongées viennent se fixer sur les poutres de la Tour.

Afin de soulager autant que possible l'appareil, on effectuait la descente des pistons après avoir rempli d'eau les cylindres. La perte de poids dans l'eau étant d'environ 80 *kg* par mètre et le poids par mètre étant d'environ 85 *kg*, la charge sur les colliers et les pinces de suspension est très faible.

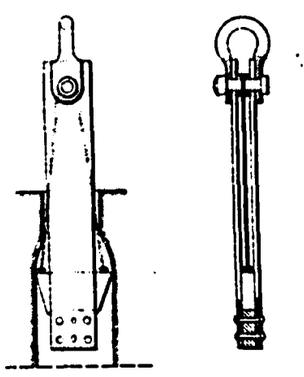


Fig. 174. — Pince pour le montage des pistons de fonte.

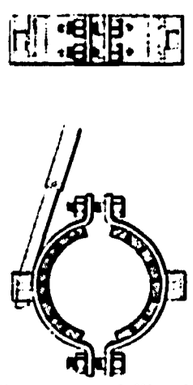


Fig. 175. — Collier de serrage des pistons.

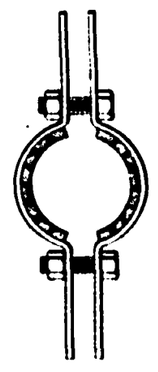


Fig. 176. — Collier de support des pistons.

§ 5. — Nombre de voyageurs transportés et rendement.

La durée d'une ascension du 2^me^ au 3^me^ étage se décompose comme suit, en supposant les cabines à peu près équilibrées.

Montée du 2^me^ étage à l'étage intermédiaire	104″
Changement de cabine	140″
Montée de l'étage intermédiaire au 3^me^ étage	104″
Sortie et entrée pour la descente	160″
Total	508″

Soit 8′28″ par voyage, ce qui donne à l'heure $\frac{3600''}{508''} = 7{,}08$, soit 7 voyages.

Chaque voyage comprenant 65 voyageurs au maximum, l'ascenseur peut donc transporter $7 \times 65 = 455$ voyageurs à l'heure.

La hauteur du 2^me^ étage au 3^me^ étage est de 160.40 *m*, la vitesse moyenne d'ascension est de $\frac{160{,}40}{208''} = 0{,}77$ *m* par seconde.

La vitesse prévue au marché était de 0,90 *m* par seconde, de manière à permettre l'ascension de 63 personnes pesant ensemble 4.000 *kg*, ce qui permettait avec 12 voyages à l'heure d'effectuer la montée de 750 voyageurs.

Ce résultat a été loin de se réaliser : d'une part parce que les cabines n'ont pas eu une vitesse suffisante, d'autre part parce que l'échange des voyageurs n'a pas pu se faire dans le temps de une minute qu'on avait supposé.

La dépense d'eau pour une ascension est de : $0{,}1608 \times 80{,}20 = 12{,}896$ m^3 ou 12.896 litres.

Quant au rendement mécanique, la différence de niveau entre les deux réservoirs, l'un ayant son niveau moyen à la cote + 307,50 et l'autre à la cote + 231,00 est de 76,50 *m*. Le travail de l'élévation de l'eau est $12.896 \times 76{,}50\ m = 986.544$ *kgm*.

Le transport de 65 voyageurs pesant 4.550 *kg*, à une hauteur de 160,40 *m*, représente un travail de 729.820 *kgm*.

Le rendement de l'appareil varie donc de 0 (cas où il n'y aurait pas de voyageurs transportés) à $\frac{729.820}{986.544} = 0{,}74$.

§ 6. — Vitesses et pressions observées.

Il a été fait de fréquentes observations sur les vitesses avec des nombres très variables de voyageurs dans les deux cabines. Dans le tableau qui suit, on a fait ressortir l'influence de la charge sur la vitesse de la cabine et on a considéré trois cas qui sont : 1° les deux cabines à peu près également chargées ; 2° la cabine A surchargée ; 3° la cabine B surchargée. Les surcharges étaient celles de la pratique courante ; elles ont été en moyenne de 37 et de 24 voyageurs pesant, à raison de 70 *kg* l'un, 2.600 *kg* et 1.700 *kg*.

Dans ce tableau, les indications de descente et de montée se rapportent dans tous les cas à la cabine

motrice A et les distances sont comptées à partir du plancher intermédiaire ou de l'origine de la course. Les temps sont comptés en secondes.

1° CABINES ÉGALEMENT CHARGÉES.						2° CABINE A SURCHARGÉE.						3° CABINE B SURCHARGÉE.					
DESCENTE.			MONTÉE.			DESCENTE Surcharge moyenne 2.600 *kg.*			MONTÉE. Surcharge moyenne 1.700 *kg.*			DESCENTE. Surcharge moyenne 1.700 *kg.*			MONTÉE. Surcharge moyenne 2.600 *kg.*		
Distances.	Temps de parcours moyen de 10 *m.*	Vitesse.	Distances.	Temps de parcours moyen de 10 *m*	Vitesse.	Distance.	Temps de parcours moyen de 10 *m.*	Vitesse.	Distance.	Temps de parcours moyen de 10 *m.*	Vitesse.	Distance.	Temps de parcours moyen de 10 *m.*	Vitesse.	Distance.	Temps de parcours moyen de 10 *m.*	Vitesse.
m.	"	*m.*	*m.*	"	*m.*	*m.*	"	*m.*	*m.*	"	*m.*	*m.*	"	*m.*	*m.*	"	*m.*
80,20	0	0	0	0	0	80,20	0	0	0	0	0	80,20	0	0	0	0	0
70	11	0,909	10	15,25	0,658	70	9,75	1,031	10	13,50	0,741	70	11,50	0,869	10	13,50	0,741
60	9	1,111	20	13,12	0,763	60	7,50	1,333	20	14	0,714	60	10	1,000	20	11,50	0,869
50	10	1,000	30	11,87	0,840	50	8,75	1,149	30	13	0,769	50	10,50	0,952	30	10,50	0,952
40	11,25	0,893	40	12	0,833	40	9,50	1,053	40	13	0,769	40	12	0,833	40	11	0,909
30	12,37	0,806	50	11,50	0,869	30	10,25	0,980	50	12,50	0,800	30	13	0,769	50	10,25	0,980
20	13	0,769	60	11,12	0,900	20	11,25	0,893	60	11,50	0,869	20	14,25	0,704	60	9,25	1,087
10	14,37	0,694	70	10,12	0,990	10	12,00	0,833	70	11,75	0,854	10	15,25	0,658	70	10	1,000
0	22,62	0,442	80,20	20,37	0,490	0	26,50	0,377	80,20	21	0,476	0	28	0,357	80,20	20,75	0,483
	104	0,771		105	0,763		94	0,844		110	0,729		114	0,703		97	0,827

Ces tableaux indiquent que, pour la montée, la vitesse va en s'accélérant du commencement de la course à la fin, quoique en principe, si l'appareil est exactement équilibré, la force produisant le mouvement soit constante sur toute la course. Cela tient à ce que la perte de charge de l'eau entre les parois du cylindre et le corps du plongeur va constamment en diminuant.

Dans la descente, au contraire, la vitesse va constamment en se ralentissant pour le motif inverse.

Cet effet est contre-balancé en partie par le manque d'équilibrage, résultant de ce que les câbles contrepoids ne pèsent pas exactement 20 *kg* par mètre courant.

Il a été fait aussi des expériences spéciales afin de mesurer les pressions intérieures, en installant des manomètres aux points suivants : Le premier sur la conduite avant le distributeur, le deuxième après le distributeur, le troisième sur le cylindre, près de l'admission d'eau, et le quatrième au fond de ce cylindre.

Les tableaux ci-dessous résument ces observations faites pour la montée et la descente de la cabine A, pendant la marche normale de l'exploitation, c'est-à-dire pour la marche des cabines ayant à très peu près une charge égale de voyageurs et une vitesse moyenne de 0,75 *m*. Les pressions observées aux manomètres sont indiquées en mètres d'eau et se rapportent au commencement, au milieu et à la fin de la course.

a) Montée de la cabine A.

POSITION DES MANOMÈTRES.	PRESSIONS OBSERVÉES.	PRESSIONS THÉORIQUES.	PERTES DE CHARGE.
Avant le distributeur.....	75 . 75 . 75	80	5 . 5 . 5
Après le distributeur.....	60 . 55 . 50	80	20 . 25 . 30
Tête du cylindre.....	50 . 58 . 40	80	30 . 22 . 40
Bas du cylindre.....	125 . 127 . 130	160	35 . 33 . 30

Il résulte des chiffres de ce tableau, dans lequel les pressions observées aux manomètres au commencement, au milieu et à la fin de la course, sont exprimées en mètres d'eau, que les pertes de charge pour chacune des parties de l'appareil sont les suivantes :

Dans la conduite principale allant du réservoir aux distributeurs. . . . . 5 *m.*
Dans le distributeur. . . . . de 15 à 25 *m.*
A l'introduction dans le cylindre. . . . . 10 *m.*
Dans le cylindre lui-même, au commencement de la course de. . . . . 5 *m.*
Elles diminuent à la fin de la course par suite de la montée du piston de. . . . . 10 *m.*
Leur ensemble varie de. . . . . 30 à 35 *m.*

Ces pertes de charge sont très considérables et montrent que le système de distribution et celui de l'introduction de l'eau dans le cylindre sont défectueux. Il serait avantageux de modifier la tête du cylindre en la remplaçant par une pièce permettant à l'eau d'être introduite sur tout le pourtour, au lieu de l'être par un orifice unique qui est presque bouché par le plongeur; celui-ci, en effet, en est éloigné de 2 centimètres seulement.

b) *Descente de la cabine* A.

Le niveau du réservoir intermédiaire est en moyenne à 3,50 *m* au-dessus des distributeurs ou du plongeur dans sa position extrême ; mais ce niveau descend souvent à 1,50 ou 2,00 *m*.

POSITION DES MANOMÈTRES.	PRESSIONS OBSERVÉES.	PRESSIONS THÉORIQUES.	PERTES DE CHARGE.
Après le distributeur.....	10 . 5 . 1	2,00	8 . 3 . »
Tête du cylindre.....	30 . 15 . 20	2,00	28 . 13 . 18
Bas du cylindre.....	110 . 108 . 110	82,00	28 . 16 . 28

Il résulte des chiffres de ce tableau que dans la descente le frottement dans le distributeur varie de. . . . . 8 *m* à 0.

Celui dans la tête du cylindre de . . . . . 20 à 18 *m*.

Celui dans le corps du cylindre de . . . . . 0 à 10 *m*.

Leur ensemble s'élève à. . . . . 28 *m*.

Ces pertes de charge sont à peu près les mêmes qu'à la montée.

§ 7. — Nouvelles expériences de vitesses et de pressions.

Nous avons fait plus récemment des expériences de vitesses et de pressions avec des charges faites non plus avec des voyageurs, mais avec des poids bien déterminés, pour les charges maxima extrêmes des cabines vides ou pleines, en ayant soin d'ouvrir en grand les distributeurs ; mais, pour éviter que les vitesses ne devinssent excessives, on n'employait qu'un seul distributeur, soit pour la descente, soit pour la montée.

Expérience n° 1. Cabine A *chargée de* 4.000 *kg et cabine* B *vide.*

Les temps T sont comptés en secondes depuis l'origine du mouvement; les temps T′ sont ceux du parcours de 10 *m*. Les distances sont comptées à partir de l'étage intermédiaire.

MONTÉE DE LA CABINE A.				DESCENTE DE LA CABINE A.				OBSERVATIONS
DISTANCES. *m*	T *s*	T′ *s*	V *m*	DISTANCES. *m*	T *s*	T′ *s*	V *m*	
0	0	0	0	80,20	0	0	0	Deux distributeurs à la montée.
10	25	25	0,400	70	17	17	0,588	Un seul à la descente.
20	48	23	0,435	60	24	7	1,420	
30	70	22	0,455	50	32	8	1,250	
40	92	22	0,455	40	41	9	1,111	
50	114	22	0,455	30	50	9	1,111	
60	135	21	0,476	20	60	10	1,000	
70	154	19	0,526	10	72	12	0,833	
80,20	185	31	0,323	0	87	15	0,667	
Vitesses moyennes....	$\frac{80,20}{185} = 0,433.$				$\frac{80,20}{87} = 0,92$			

Expérience n° 2. Cabine A *vide, cabine* B *chargée de* 3.450 *kg.*

MONTÉE DE LA CABINE A.				DESCENTE DE LA CABINE A.				OBSERVATIONS.
DISTANCES. *m*	T *s*	T′ *s*	V *m*	DISTANCES. *m*	T *s*	T′ *s*	V *m*	
0	0	0	0	80,20	0	0	0	Un seul distributeur à la montée.
10	25	25	0,40	70	25	25	0,40	Deux à la descente.
20	44	19	0,579	60	37	12	0,833	
30	60	16	0,625	50	58	21	0,476	
40	70	10	1,000	40	81	23	0,435	
50	79	9	1,111	30	106	25	0,400	
60	88	9	1,111	20	133	27	0,370	
70	97	9	1,111	10	165	32	0,312	
80,20	107	10	1,00	0	215	50	0,200	
Vitesses moyennes....	$\frac{80,20}{107} = 0,75$				$\frac{80,20}{215} = 0,374$			

Expériences n^os 2^bis et 2^ter. Cabine A *vide. Cabine* B *chargée de* 3.800 *kg et de* 4.400 *kg.*

Ces expériences, faites avec les distributeurs ouverts en grand, n'ont porté que sur la descente de A, afin de connaître la limite de la charge de la cabine B.

DISTANCES. m	CHARGE DE 3.800 kg. T	CHARGE DE 3.800 kg. T' m	CHARGE DE 3.800 kg. V m	CHARGE DE 4.400 kg. T m	CHARGE DE 4.400 kg. T' m	CHARGE DE 4.400 kg. V m	OBSERVATIONS.
80,20	0	0	0	0	0	0	Les deux distributeurs sont ouverts.
70	26	26	0,385	31	31	0,323	
60	38	12	0,830	54	23	0,435	Avec la charge de 3.800 dans la cabine B, la marche est pénible. Avec celle de 4.400, la cabine atteint très difficilement l'étage supérieur; c'est l'extrême limite de charge.
50	58	20	0,500	80	26	0,385	
40	81	23	0,435	110	30	0,333	
30	105	24	0,417	148	38	0,263	
20	132	27	0,370	192	44	0,227	
10	165	33	0,303	255	63	0,159	
0	212	47	0,213	330	75	0,133	
Vitesses moyennes.....		$\frac{80,20}{212} = 0,378$			$\frac{80,20}{330} = 0,242$		

Quant aux pressions manométriques, elles ont été les suivantes :

DÉSIGNATION DE L'EXPÉRIENCE.	VITESSE MOYENNE.	PRESSIONS OBSERVÉES. APRÈS DISTRIBUTEUR.	PRESSIONS OBSERVÉES. TÊTE DU CYLINDRE.	PRESSIONS OBSERVÉES. BAS DU CYLINDRE.	PRESSIONS THÉORIQUES.	PERTES DE CHARGE. APRÈS DISTRIBUTEUR.	PERTES DE CHARGE. TÊTE DU CYLINDRE.	PERTES DE CHARGE. BAS DU CYLINDRE.	OBSERVATIONS.
Montée de la cabine A.									
1. A, 4.000 *kg*. B, vide.....	0,433	60 . 70 . 65	60 . 70 . 67	142.143.145	80 et 160	20 . 10 . 15	20 . 10 . 13	18 . 17 . 15	2 distributeurs.
2. A, vide. B, 3.450 *kg*.	0,750	45 . 35 . 20	50 . 30 . 20	100.105.100	»	35 . 45 . 60	30 . 50 . 60	60 . 55 . 60	1 distributeur.
Descente de la cabine A.									
1. A, 4.000 *kg*. B, vide.....	0,92	30 . 20 . 10	30 . 20 . 10	125.130.125	2 et 82	28 . 18 . 8	28 . 18 . 8	43 . 48 . 43	1 distributeur.
2. A, vide. B, 3.450 *kg*.	0,374	5 . 2 . 1	5 . 2 . 1	92 . 92 . 90	»	3 . 0 . 0	3 . 0 . 0	10 . 10 . 8	2 distributeurs.
2*bis*. A, vide. B, 3.800 *kg*.	0,378	5 . 2 . 1	5 . 2 . 1	92 . 92 . 90	»	3 . 0 . 0	3 . 0 . 0	10 . 10 . 8	
2*ter*. A, vide. B, 4.400 *kg*.	0,242	5 . 2 . 1	5 . 2 . 1	90 . 88 . 87	»	3 . 0 . 0	3 . 0 . 0	8 . 6 . 5	

On voit, à l'examen de ce tableau, en comparant les pertes de charge à celles que nous avons observées quand les cabines étaient chargées également :

1° Que pendant la montée de la cabine A surchargée, les pertes de charge diminuent, ce qui tient à la diminution de la vitesse, laquelle n'est plus que 0,43 *m* au lieu de 0,75 *m*. Cette diminution est de 15 *m* environ ;

2° Que pendant la montée de la cabine A vide, la vitesse ne peut rester normale que par l'emploi d'un seul distributeur, même partiellement étranglé : aussi les pertes de charge s'élèvent beaucoup, soit d'environ 25 à 30 *m* ;

3° Que pendant la descente de la cabine A surchargée, l'emploi d'un seul distributeur augmente les pertes de charge de 15 *m* en moyenne;

4° Enfin, que pour la descente de cette même cabine vide, la vitesse décroît considérablement et que les pertes de charge diminuent de 20 *m* en moyenne.

En résumé, l'appareil, qui fonctionne assez convenablement quand les cabines sont à peu près également chargées, se comporte au contraire assez mal quand l'inégalité de charge atteint les cas extrêmes prévus.

En effet, quand la cabine A est pleine et l'autre vide, la vitesse à la montée n'est que la moitié de celle que l'on se proposait de réaliser, et à la descente la perte de charge s'élève à 45 *m* environ.

Quand au contraire la cabine B est pleine et que l'autre est vide, la perte de charge pendant la montée atteint 55 *m* environ, et pendant la descente la vitesse n'est plus que de 0,38 *m*.

§ 8. — Équilibrage du système.

Les cas extrêmes que nous venons d'examiner sont ceux d'après lesquels on a dû déterminer les dimensions générales de l'appareil au point de vue de son équilibrage, que nous allons vérifier en prenant les pressions résultant des différences réelles de niveau, soit 160 *m* au bas du cylindre pour la montée et 82 *m* pour la descente.

1° Le cas le plus défavorable pour la montée est celui de la cabine A pleine, la cabine B étant vide ; quant à la position, la plus défavorable est celle au commencement de la course, puisque sous la charge de 4.000 *kg* la vitesse va, d'après les observations précédentes, constamment en augmentant.

	côté A *kg*	côté B *kg*
Les forces produisant le mouvement sont :		
Câbles du côté B (Voir § 2)		5.802
Pression sur les plongeurs : 1.608 cm^2 × 16 *kg*		25.728
Les forces s'opposant au mouvement sont :		
Câbles du côté A (Voir § 2)	7 142	
Charge de la cabine A	4.000	
Poids des pistons	17.500	
	28.642	
Résistances passives, pertes de charge, etc	2.888	
Total égal	31.530	31.530

2° Le cas le plus défavorable pour la descente est celui de la cabine A vide, la cabine B étant chargée, à la fin de la descente. Avec la charge de 4.400 que l'on a pu réaliser comme limite, la vitesse a été constamment en se ralentissant et est devenue sensiblement nulle quand la cabine est revenue à l'origine de la course dans la position précédente.

	côté A *kg*	côté B *kg*
Les forces produisant le mouvement sont :		
Le poids du câble du côté A	7.142	
Le poids des pistons	17.500	
Les forces s'opposant au mouvement sont :		
Câbles du côté B		5.802
Charge de B		4.400
Pression sur les pistons : 1.608 × 8,2		13.186
		23.388
Frottements et pertes de charge		1.254
Total égal	24.642	24.642

3° Faisons l'équilibrage pour les cabines également chargées.

Le point où les vitesses sont les plus faibles est toujours celui correspondant à l'origine de la course, soit pour la montée, soit pour la descente.

Pour la montée on a :

	côté A *kg*	côté B *kg*
Forces produisant le mouvement :		
Câbles du côté B		5.802
Pression sur les plongeurs : 1.608 × 16		25.728
Forces opposées au mouvement :		
Câbles du côté A	7.142	
Poids des pistons	17.500	
	24.642	
Il reste pour les frottements et pertes de charge	6.888	
Total égal	31.530	31.530

Pour la descente on a :

	côté A *kg*	côté B *kg*
Forces produisant le mouvement :		
Câbles du côté A	7.142	
Poids des pistons	17.500	
Forces opposées au mouvement :		
Câbles du côté B		5.802
Pression sur les plongeurs : 1.608 × 8,2		13.186
		18.988
Reste pour les frottements et pertes de charge		5.654
Total égal	24.642	24.642

Il est intéressant de vérifier cet équilibrage avec les pressions réelles données par les manomètres.

Nous prendrons d'abord le cas le plus général, c'est-à-dire celui des cabines également chargées.

1° *Cabines également chargées.* — Dans le cas précédemment examiné, c'est-à-dire au commencement de la montée, on a :

	côté A *kg*	côté B *kg*
Forces produisant le mouvement :		
Câbles du côté B		5.802
Pression sur les plongeurs : 1.608 × 12,5 (voir p. 182)		20.160
Forces opposées au mouvement :		
Câbles du côté A	7.142	
Poids des pistons	17.500	
	24.642	
Il reste disponible pour les frottements mécaniques	1.260	
Total égal	25.902	25.902

A la fin de la descente, c'est-à-dire pour la même position des pistons, on a :

Forces produisant le mouvement :	côté A *kg*	côté B *kg*
Câbles du côté A	7.142	
Poids des pistons	17.500	
Forces opposées au mouvement :		
Câble du côté B		5.802
Pression sur les plongeurs : 1.608 × 11 (p. 183)		17.088
		23.490
Il reste disponible pour les frottements mécaniques		1.152
Total égal	24.642	24.642

On peut également étudier les deux autres cas extrêmes.

2° *Cabine A chargée, B vide.* — Au commencement de la montée, on a :

Forces produisant le mouvement :	côté A *kg*	côté B *kg*
Câbles du côté B		5.802
Pression sur les plongeurs : 1.608 × 14,5 (p. 184)		23.316
Forces opposées au mouvement :		
Câbles du côté A	7.142	
Charge de la cabine A	4.000	
Poids des pistons	17.500	
	28.642	
Il reste disponible pour les frottements des organes	476	
Total égal	29.118	29.118

3° *Cabine A vide, B chargée.* — A la fin de la descente, on a :

Forces produisant le mouvement :		
Câbles du côté A	7.142	
Poids des pistons	17.500	
Forces opposées au mouvement :		
Câbles du côté B		5.802
Charge de B		4.400
Pression sur les plongeurs : 1.608 × 8,7 (p. 184)		13.990
		24.192
Il reste disponible pour les frottements mécaniques		450
Total égal	24.642 *kg*	24.642 *kg*

Nous ajoutons beaucoup plus de confiance, comme frottement des organes, aux chiffres donnés dans le cas des cabines également chargées, que dans les deux cas extrêmes où les pertes de charge sont très faibles, et plus facilement influençables par des manœuvres de distributeurs. Ce sont les chiffres de 1.260 *kg* pour la montée et 1.152 *kg* pour la descente, que nous adopterons.

CALCULS DE L'ASCENSEUR

§ 1. — Hauteurs de chute.

Il y a tout d'abord lieu de déterminer les hauteurs de chute qui sont l'une des principales données de la question.

Les cotes de niveau résultant des dimensions de l'appareil sont les suivantes :

1° *Piston plongeur.* — Partie supérieure du piston plongeur en haut de sa course (309,63 — 0,875) = ... + 308,755 *m*

Longueur du piston plongeur (une longueur de 0,76 reste engagée dans le cylindre) ..... 80,960 *m*

Partie inférieure du piston au haut de sa course ..... + 227,795 *m*

Course ..... 80,200 *m*

Partie inférieure du piston au bas de sa course ..... + 147,595 *m*

Dessus du cylindre (227,80 + 0,76) ..... + 228,560 *m*

Niveau de la tubulure d'introduction de l'eau dans le cylindre (228,56 — 0,26) ..... + 228,300 *m*

2° *Réservoir supérieur.*

Niveau maximum ..... + 309 *m*
Niveau minimum ..... + 305 *m* } Niveau moyen admis... + 307,500 *m*.

3° *Réservoir intermédiaire de décharge.*

Niveau moyen (le niveau inférieur est fréquemment à la cote + 230). + 231,00 *m*

Il en résulte que l'on a comme données relatives à ces niveaux :

Hauteur d'eau sous le piston pendant la montée. { 1° En bas de sa course, 307,50 — 147,60 = 159,90 *m* ; 2° En haut de sa course, 307,50 — 227,80 = 79,70 *m*

Hauteur d'eau au refoulement pendant la descente. { 1° En haut de la course, 231,00 — 227,80 = 3,20 *m* ; 2° En bas de la course, 3,20 + 80,20 = 83,40 *m*

Longueur de la conduite allant au réservoir supérieur ..... 90,00 *m*

§ 2. — Détermination du diamètre et du poids du piston.

Quand la cabine motrice A, étant vide, est dans le haut de sa course et quand la cabine contrepoids B, étant chargée de la charge maxima imposée, soit 4.000 *kg*, est dans le bas de sa course, il faut que le mouvement se produise et que la cabine A entraîne la cabine B. Pour cela, il faut qu'il y ait du côté de A un excédent de poids non équilibré de 4.000 *kg* au moins.

D'autre part, comme l'ascenseur doit aussi pouvoir élever jusqu'à la fin de la course la cabine A chargée de 4.000 *kg*, la cabine B étant vide, il s'ensuit que l'effort sur le piston doit pouvoir atteindre 4.000 *kg*, plus l'excédent de poids précédent qui est également de 4.000 *kg*.

Il doit donc atteindre 8.000 *kg* au moins, sans compter les frottements dans les organes mécaniques et les pertes de charge hydrauliques.

En admettant un rendement de 65 p. 100, soit une perte de 35 p. 100 pour l'effort moteur, l'effort sur le piston devra s'élever à $\frac{8.000}{0,65} = 12.300$ *kg*, ce qui correspond à une perte en frottements de toute nature de 4.300 *kg*.

La pression motrice étant de 80 *m*, soit 8 *kg* par *cm*², la section de chacun des pistons sera de $\frac{6.150}{8} = 769$ *cm*², qui correspond à un diamètre de 0,313 *m*.

On a adopté le diamètre de 0,32 *m* donnant une section de 804 *cm*².

L'effort total est ainsi de $804 \times 8 \times 2 = 12.800$ *kg* et l'effort disponible pour parer aux frottements de toute nature est de 4.800 *kg*.

Ces mêmes considérations vont nous permettre de déterminer le poids des pistons.

En prenant les cabines dans la première position ci-dessus, si la descente de A vide s'opère, ce ne peut être que par le poids du piston, puisque l'eau sort librement du cylindre.

En éliminant les poids qui se font équilibre, tels que les poids des cabines ou ceux des câbles au-dessus du 3e étage, le poids du piston devra être au moins égal à celui agissant sur les parties du côté opposé. — Ce poids P est la somme des poids suivants :

*p*H poids des câbles d'enroulement pour la hauteur de la course, H étant cette course et *p* leur poids par mètre courant.

P_1 poids des câbles de suspension dont la longueur est également H.

V_2 la charge en voyageurs de la cabine B.

R l'ensemble des résistances passives s'opposant au mouvement.

C'est-à-dire que l'on a $P = pH + P_1 + V_2 + R$.

Pour que l'équilibre se maintienne pendant la descente, il faut que la perte de poids due au déplacement de l'eau par le plongeur s'enfonçant dans le cylindre soit compensée par le poids du câble d'enroulement entraîné par le piston sur la poulie placée dans son axe : ce poids du câble, qui passe d'un côté à l'autre des poulies supérieurs et agit ainsi doublement, doit donc être égal à la moitié du poids de l'eau déplacée par le plongeur : ce poids par mètre courant est de $\frac{1}{2} \times 0,1608 \times 1000 = 80,4$ *kg* ; pour la longueur H = 80,20 *m*, le poids *p*H est de 6.448 *kg*.

Le poids des câbles de suspension correspond à la force nécessaire pour supporter la cabine. Sa section a été prise telle que son poids est de 12 *kg* par mètre courant et par câble, soit pour les quatre câbles 48 *kg*, ce qui, pour la longueur H = 80,20 *m*, donne un poids P_1 de $80,20 \times 48 = 3.850$ *kg*.

La surcharge imposée V_2 est de 4.000 *kg*.

Enfin, si on admet le chiffre précédent de 35 p. 100 de perte, soit une valeur de K = 4.800, on a $P = 6.448 + 3.850 + 4.000 + 4.800 = 19.098$ *kg*, soit en iron 19.000 *kg*.

Ce poids peut d'ailleurs être constitué non seulement par le poids du piston proprement dit, mais encore par une surcharge spéciale dans la cabine A que l'on met à la demande au moment de régler définitivement l'équilibrage et, enfin, par l'excédent de poids du côté A des câbles.

Le poids du piston proprement dit et de l'excédent de poids de la cabine A est de	17.500 *kg*
L'excédent de poids des câbles du côté A est de...	1.047
Total.....	18.547 *kg*

qui se rapproche sensiblement du chiffre indiqué ci-dessus.

Enfin, quant au diamètre du cylindre, il est déterminé par la considération que l'eau n'éprouve pas une trop grande résistance dans sa circulation entre le plongeur et le cylindre, et pour cela que cette eau n'ait pas dans cette partie annulaire une trop grande vitesse. Celle qui est généralement admise ne dépasse pas 2 *m*.

Or, avec la vitesse que doit avoir l'appareil d'après le contrat, soit 0,90 par seconde, le volume d'eau déplacé par seconde est de $0,0804 \times 0,90$ par cylindre, soit 0,07236 *m*³. La surface annulaire correspondant à la vitesse d 2,00 *m* est de $\frac{0,07236}{2} = 0,03618$ *m*². La surface totale est donc de $0,0804 + 0,03618 = 0,1165$, laquelle correspond à un diamètre de 0,385 *m*.

Le diamètre du cylindre eût donc dû être de 0,38 *m* au moins, soit environ 0,40 *m* ainsi qu'il était prévu au contrat. Malheureusement, il a été pris plus petit, soit de 0,36 seulement. La surface totale est alors de 1,018 *m*, la surface annulaire de 1.018 — 804 = 214 *cm*². La vitesse de l'eau pour un débit de 0,0721 *m*³ devient $\frac{0,0721}{0,0214} = 3,40$ *m*. Cette vitesse est trop grande et donne lieu à des pertes de charge trop fortes.

§ 3. — Pertes de charge.

Pour apprécier quelles sont les pertes de charge, il faut rechercher quelles sont les vitesses de l'eau, soit dans la conduite principale allant du réservoir supérieur au distributeur, soit dans la canalisation du distributeur aux cylindres, pour une vitesse déterminée de la cabine.

Cette vitesse, comme nous l'avons vu, est très variable suivant les charges de celle-ci. Lorsque la cabine motrice porte 4.000 *kg* et que la cabine contrepoids est vide, l'ascension se produit, mais très péniblement, la vitesse reste au-dessous de 0,50 *m*, soit 0,43 *m*. Il y a donc lieu de déterminer les pertes de charge qui correspondent à une vitesse de cabine d'environ 0,45 *m*.

Quand les cabines sont à peu près également chargées, la vitesse moyenne est d'environ 0,75 *m* et les pertes de charge deviennent beaucoup plus grandes.

Enfin, on ne peut atteindre la vitesse moyenne prévue de 0,90 *m*, qu'à la descente de la cabine A complètement chargée, l'autre étant vide. Pour une telle vitesse, les pertes de charge à la montée sont trop importantes pour permettre le mouvement.

Nous commencerons par établir le tableau ci-dessous, dans lequel nous supposerons que l'alimentation du cylindre est faite simultanément par les pompes et par le réservoir supérieur.

Les pertes de charge augmenteraient sensiblement si, pendant une montée, les pompes s'arrêtaient, ce qui a lieu, du reste, chaque fois que le réservoir supérieur est plein.

Quant aux pertes résultant du passage et de l'introduction de l'eau dans le distributeur et dans les cylindres, et du frottement entre le piston et le cylindre, comme elles sont difficilement calculables, nous admettrons, comme l'a montré l'expérience, que celle provenant du distributeur est de 20 *m*, celle de l'entrée dans les cylindres 10 *m*, et enfin celle due au passage dans la section annulaire 5 *m*. Toutes ces pertes de charge correspondent à la vitesse moyenne de 0,75 *m*. Pour les deux autres vitesses de 0,45 et de 0,90 *m*, nous admettrons que les pertes de charge varient dans le rapport de celles d'une conduite de 0,150 *m*, qui est le diamètre des conduites du distributeur. Cette section équivaut aussi à peu près à celle du vide existant entre le piston et le cylindre.

VITESSE DE LA CABINE.	0.45	0,75	0.90
Pistons. — Section totale : 0,1608 m^2.			
Débit correspondant en litres par seconde.....	72,5	120	145
Pompes. — 30 tours à la minute donnant par machine 120 cylindrées de 10,166 *l*, soit pour les deux machines et pour 1', $\frac{10,166 \times 240}{60} = 40\,l$..	40	40	40
Le débit du réservoir doit donc être la différence, soit.....	32,5	80	105
Conduite de 0,200 *m* venant du réservoir supérieur. — Section : 0,0314 m^2.			
Vitesse de l'eau dans la conduite.....	1,05 *m*	2,54 *m*	3,34 *m*
Perte de charge par mètre due au frottement $J = \frac{4 \times 0,0001 V^2}{D}$	0,008	0,052	0,09
Longueur de la conduite : 90 *m*.			
Perte due au frottement.....	0,72	4,68	8,10
Hauteur d'eau génératrice de la vitesse et pertes dues aux changements de section $\frac{3}{2}\frac{V^2}{2g}$	0,10	0,50	0,57
Perte de charge totale dans la conduite de 0,200 *m* en mètres.....	0,82	5,18	8,67
Conduites de 0,150 *m* du distributeur aux cylindres. — Section : 0,0177 m^2.			
Débit pour chacune des deux conduites.....	36,25 *l*	60 *l*	72,50 *l*
Vitesse de l'eau dans la conduite.....	2,05 *m*	3,40 *m*	4,10 *m*
Perte de charge par mètre J, due au frottement.	0,01	0,092	0,18
Longueur des deux conduites de 0,150 *m* : 22 *m*.			
Perte due au frottement.....	0,88	2,02	3,96
Total des pertes de charge dans les conduites de 0,200 et 0,150 *m*.....	1,70 *m*	7,20 *m*	12,63 *m*
Pratiquement, on trouve pour ce total, 5 *m* pour la vitesse de 0,75 *m*.....	1,20	5	8,80
Perte de charge dans le distributeur.....	8,70	20	39
— à l'entrée dans les cylindres....	4,35	10	19,50
Total des pertes de charge jusqu'à la tête du cylindre.....	14,25	35	67,30
Perte de charge à l'intérieur du cylindre.....	2,17	5	9,75
Total des pertes de charge jusqu'au bas du cylindre.....	16,42 *m*	40 *m*	77,05 *m*

Nous représentons graphiquement ci-dessous la variation des pertes de charge, suivant les différentes vitesses de la cabine. Les deux courbes, dont l'une correspond aux pertes de charge au fond du cylindre, et l'autre à celles en tête du

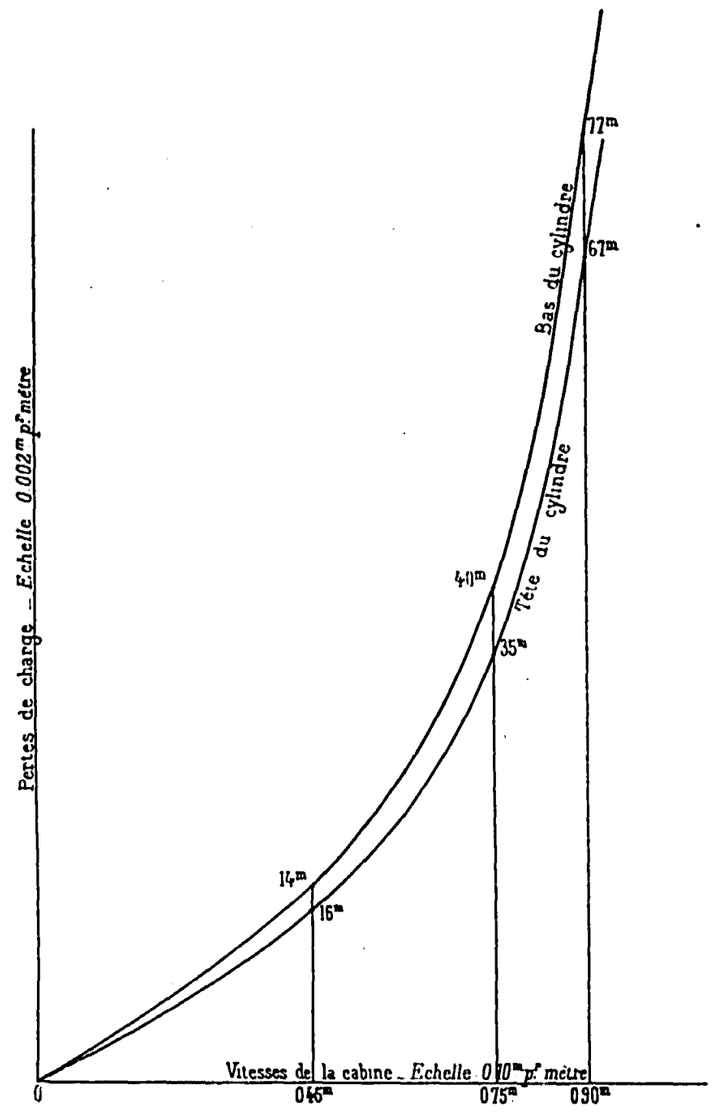


Fig. 177.

cylindre, permettent d'avoir les pertes de charges en ces points, pour les vitesses intermédiaires de la cabine entre 0 et 0,90 *m* (Voir fig. 177).

Ce sont ces pertes de charge qui, dans nos calculs, viendront en déduction des hauteurs d'eau agissant sous les pistons.

On peut observer qu'elles restent un peu inférieures à celles résultant de l'observation directe, lesquelles, d'après les courbes ci-contre, correspondraient à une vitesse de 0,80 *m*. Mais il y a lieu de remarquer que l'observation manométrique a été faite au moment où, les pistons étant déjà en marche et ayant franchi les dix premiers mètres, la vitesse à ce moment dépassait la vitesse moyenne de 0,75 *m* et se rapprochait en effet de 0,80 *m*.

§ 4. — Détermination des résistances passives.

Ces résistances comprennent :

a) Le frottement des pistons sur les cuirs des garnitures.
b) Les frottements des axes des poulies supérieures.
c) La raideur des câbles.

La première de ces valeurs dépend de la pression dans le cylindre ; les deux autres de la charge de l'appareil. La pression et les charges agissent inversement ; ou en d'autres termes la pression est d'autant plus faible que les deux cabines sont plus également chargées. Il convient donc de faire cette recherche pour les deux hypothèses ; soit les deux cabines chargées, soit une seule cabine chargée.

1re hypothèse. — *Les deux cabines également chargées.*

a) *Frottement du piston sur les cuirs du cylindre.* — Nous pouvons admettre que la pression effective observée à la tête du cylindre est de 50 *m*. Le cuir a une hauteur de 0,05 *m*, un développement de 1,00 *m*, soit une surface de 500 cm^2, et par suite une pression de $500 \times 5 = 2.500$ *kg*, soit pour les deux presses 5.000 *kg*.

En prenant un coefficient de frottement de l'acier sur le cuir égal à 0,10, l'effort cherché sera de 500 *kg*.

b) *Frottement des axes des poulies supérieures.* — Déterminons quelle est la plus grande pression existant au contact des axes des poulies sur leurs coussinets.

Le poids total de l'appareil comprend :

Deux pistons.....	17.500
6 poulies supérieures.....	5.370
1 cabine A.....	8.700
1 cabine B (y compris parachute).....	8.700
Câbles 7,238 + 3,780.....	11.024
Chapes, attaches des câbles, etc.....	2.380
Total..	53.674
Poids des voyageurs.	8.000
Total.....	61.674

Il faut retrancher de ce poids la pression hydraulique, à fin de course pour la montée, et qui, nous avons vu, est égale à 40 *m*, de sorte que la pression maxima agissant sur l'axe des poulies est finalement :

$$61.074 - 4 \times 1.608 = 55.242 \ kg.$$

Les poulies de renvoi supérieures ont un diamètre moyen d'enroulement de 1,266 *m* et un axe de 0,180 *m* de diamètre. Si nous admettons pour coefficient de frottement des axes dans leurs coussinets la valeur de 0,07, nous aurons pour valeur du frottement dû à ces axes :

$$55.242 \times \frac{0,180}{1,266} \times 0,07 = 570 \ kg.$$

c) *Raideur des câbles.* — La tension totale des câbles est égale au chiffre trouvé plus haut, 55.242, diminué du poids des poulies 5.370, soit 55.242 — 5.370 = 49.872 *kg*.

Chacun des quatre câbles a donc une tension de $\frac{49\,872}{4 \times 2} = 6.234 \ kg$.

M. Murgue a trouvé (*Annales des Ponts et Chaussées*, 1887, p. 645), pour un câble d'extraction en acier neuf de 30 *mm* de diamètre, la formule suivante R = 9,044 + 0,00807 T, quand ce câble est neuf, et les $\frac{2}{3}$ de cette résistance quand il est lubrifié. Nous assimilerons notre câble de 0,20 *m* de largeur et 0,032 *m* d'épaisseur à six câbles ronds, semblables à ceux qui ont été expérimentés par M. Murgue, et la raideur cherchée sera $R = \frac{2}{3} 6 \ (9,044 + 0,008 \ T)$ dans laquelle $T = \frac{6.234}{6} = 1.039 \ kg$.

On trouve ainsi R = 69 *kg*, soit pour les quatre câbles 4 × 69 = 276 *kg*.

Le total des trois résistances est ainsi de :

$$500 + 570 + 276 = 1.346 \ kg.$$

Remarquons que pour la descente, la pression sur la garniture du cylindre n'étant plus que de 2 *kg* environ par *cm*², le frottement qui en résulte pour les deux presses est 2 × 500 × 2 × 0,10 = 200 *kg*, ce qui donne pour total des résistances passives à la descente :

$$200 + 570 + 276 = 1.046 \ kg.$$

2e **hypothèse.** — *Cabine motrice chargée de 4.000 kg.*

a) *Frottement des pistons sur les cuirs des garnitures.* — La pression effective à la tête du cylindre varie de 60 à 70 *m*, soit en moyenne 65 *m*, et le frottement sur le cuir sera 500 × 6,5 × 0,10 = 325 *kg*, soit pour les deux pistons 650 *kg*.

b) *Frottement des axes des poulies supérieures.* — Pour les poulies, le poids total agissant n'est plus que de 61.074 — 4.000 = 57.074 *kg*, duquel il faut retrancher la plus faible pression hydraulique, laquelle est de 65 *m* à fin de course. Il reste donc 57.074 — 1.608 × 6,5 = 47.222. Le frottement sera de $47.222 \times \frac{0,180}{1,266} \times 0,07 = 469 \ kg$.

c) *Raideur des câbles.* — Pour les câbles, la tension générale est égale au chiffre précédent 47.222 *kg*, diminué du poids des poulies 5.370 *kg*, soit 41.852 *kg*, et la raideur de 276 *kg* sera multipliée par le rapport de $\frac{41.852}{49.872} = 0,84$, ce qui donne 276 × 0,84 = 232 *kg*.

Le total des trois résistances est ainsi de :

$$650 + 469 + 232 = 1.351 \ kg.$$

Pour la descente, comme dans la 1re hypothèse, le frottement des garnitures peut être évalué à 200 *kg*, correspondant à une pression unitaire de 2 *kg* sur le cuir, et le total des résistances passives devient alors 200 + 469 + 232 = 901 *kg*.

Nous rappellerons qu'expérimentalement, nous avons trouvé pour valeur de ces résistances passives : pour la montée 1.260 *kg* et pour la descente 1.152 *kg*.

Nous adopterons les deux chiffres de 1.300 *kg* et 1.100 *kg* en nombres ronds.

§ 5. — Équilibre du système.

Nous nous proposons de déterminer sous quelle pression le mouvement pourra se produire dans les différents cas des charges. La vitesse de ce mouvement sera d'autant plus grande que la pression trouvée restera plus inférieure à celle dont on dispose, puisque le mouvement sera compatible avec de plus fortes pertes de charge.

Désignons par :

C_1 et C_2, le poids de la cabine motrice et celui de la cabine contrepoids. Soit 8.700 *kg*.

V_1, le poids des voyageurs de la cabine motrice.

V_2, celui des voyageurs de la cabine contrepoids.

V_1 et V_2 peuvent varier de 0 à 4.000 *kg*.

P, la somme des poids des pistons, de l'excédent du poids de la cabine A, et des câbles du côté A, P = 17.500 + 1.047 = 18.547 *kg* (voir p. 175).

P_1, le poids de la portion des câbles qui ne s'enroule pas sur les poulies, $P_1 = 5.802$ *kg* (p. 175).

p, le poids par mètre courant de la portion des câbles s'enroulant sur les poulies, *p* = 4 × 19 = 76 *kg*.

S, la section des pistons en *cm*², S = 1.608 *cm*².

H, la course, H = 80,20 *m*.

H', la pression déterminant le mouvement mesurée au niveau de la face inférieure du piston dans le haut de sa course. Théoriquement on a H' = 79,70.

H'_1, la hauteur d'eau, sous le piston à la descente, au commencement de la course, $H'_1 = 3,20$ *m*.

R, l'ensemble des résistances passives, évalué à 1.300 *kg* pour la montée, et 1.100 *kg* pour la descente.

1° Montée.

Si *x* est l'ordonnée d'une position quelconque du piston pendant la montée (voir fig. 178, p. 190), la force ascensionnelle est :

$$\frac{S}{10}(H' + H - x) + px + P_1 + C_2 + V_2.$$

La force dirigée en sens contraire est :

$$P + C_1 + V_1 + p(H - x) + R.$$

Pour qu'il y ait mouvement, on doit avoir :

$$(1) \qquad \frac{S}{10}(H' + H - x) + px + P_1 + C_2 + V_2 > P + C_1 + V_1 + p(H - x) + R.$$

Le cas le plus défavorable est certainement celui où, l'ascenseur commençant sa course, la cabine C_1 sera chargée au maximum et la cabine C_2 vide. On a ainsi $x = 0$, $V_2 = 0$, $V_1 = 4.000$ *kg*, $C_1 = C_2$.

La relation (1) devient

$$\frac{S}{10}(H + H') + P_1 > P + 4.000 + pH + R.$$

En introduisant les valeurs numériques :

$P_1 = 5.802$, P = 18.547, *p*H = 6.095, R = 1.300

on a :

$$160,8 \ (H + H') > 24.140.$$
$$H' + H > 150 \ m.$$

La pression hydraulique théorique est 79,70 + 80,2 = 159,9, soit 160 *m*. Nous disposons donc d'un excès de pression de 10 *m* environ, qui représentera les pertes de charge compatibles avec le mouvement. En cherchant sur la courbe des pertes de charge, pour le bas du cylindre, nous voyons que la vitesse correspondante est de 0,30 *m*.

A la fin de la course et dans les mêmes conditions, nous avons pour $x = H$:

$$160,8 \, H' + 6.095 + 5.802 > 18.547 + 4.000 + 1.300$$

ou

$$160,8 \, H' > 12.050$$

et

$$H' > 75 \ m.$$

La pression hydraulique théorique est de 79,70 *m* qui excède la pression nécessaire de 5 *m* environ. D'après la courbe relative à la tête du cylindre, la vitesse à la fin de la course sera donc d'environ 0,20 *m*, et la vitesse moyenne pendant la course de 0,25 *m*.

Il faut remarquer que si l'appareil avait été correctement établi, c'est-à-dire si on avait $\frac{S}{10} = 2p$, correspondant à un poids de 20,1 *kg* par câble, la relation (1) deviendrait indépendante de *x*, et la force motrice resterait constante pendant toute la course.

Dans cette hypothèse et avec la même charge de cabine, la relation deviendrait :

$$(2) \qquad \frac{S}{10}(H' + H) + P_1 + V_2 > P + V_1 + pH + R.$$

Les valeurs numériques à introduire sont (voir note p. 175).

$$P_1 = 5.818, \ V_2 = 0, \ P = 17.500 + 1.069 = 18.569, \ pH = 6.448,$$
$$R = 1.300 \text{ et } V_1 = 4.000$$

on trouve :

$$\frac{S}{10}(H' + H) > 24.499$$

et

$$H' + H > 152 \ m.$$

Cette pression est donc inférieure d'environ 8 *m* à la pression théorique et correspond à une vitesse de 0,25 *m* ; celle-ci devrait théoriquement rester constante pendant toute la course, mais pratiquement elle tend à augmenter par suite de la diminution des pertes de charge dans le cylindre, vers la fin de la course.

Examinons maintenant le cas des cabines également chargées. La relation (1) devient :

$$(3) \qquad \frac{S}{10}(H' + H - x) + px + P_1 > P + p(H - x) + R.$$

Qui pour $x = 0$ donne :

$$\frac{S}{10}(H' + H) + P_1 > P + pH + R$$

d'où

$$H' + H > 125 \ m.$$

La pression hydraulique, qui est 159,90 *m*, excède donc la précédente de 35 *m*. Cet excès correspond d'après la courbe des pertes de charge à une vitesse de 0,72 *m*, et pratiquement, comme nous l'avons vu, à 0,77 *m*.

Pour $x = H$ nous avons :

$$160{,}8\,H' + 6.095 + 5.802 > 18.547 + 1.300$$

d'où

$$H' > 49\ m.$$

L'excès de pression est 79,70 — 49 = 31 *m*, correspondant à une vitesse de 0,73 *m*, aquelle pratiquement est d'environ 0,77 *m*.

La vitesse tend donc à s'accélérer du commencement à la fin de la course.

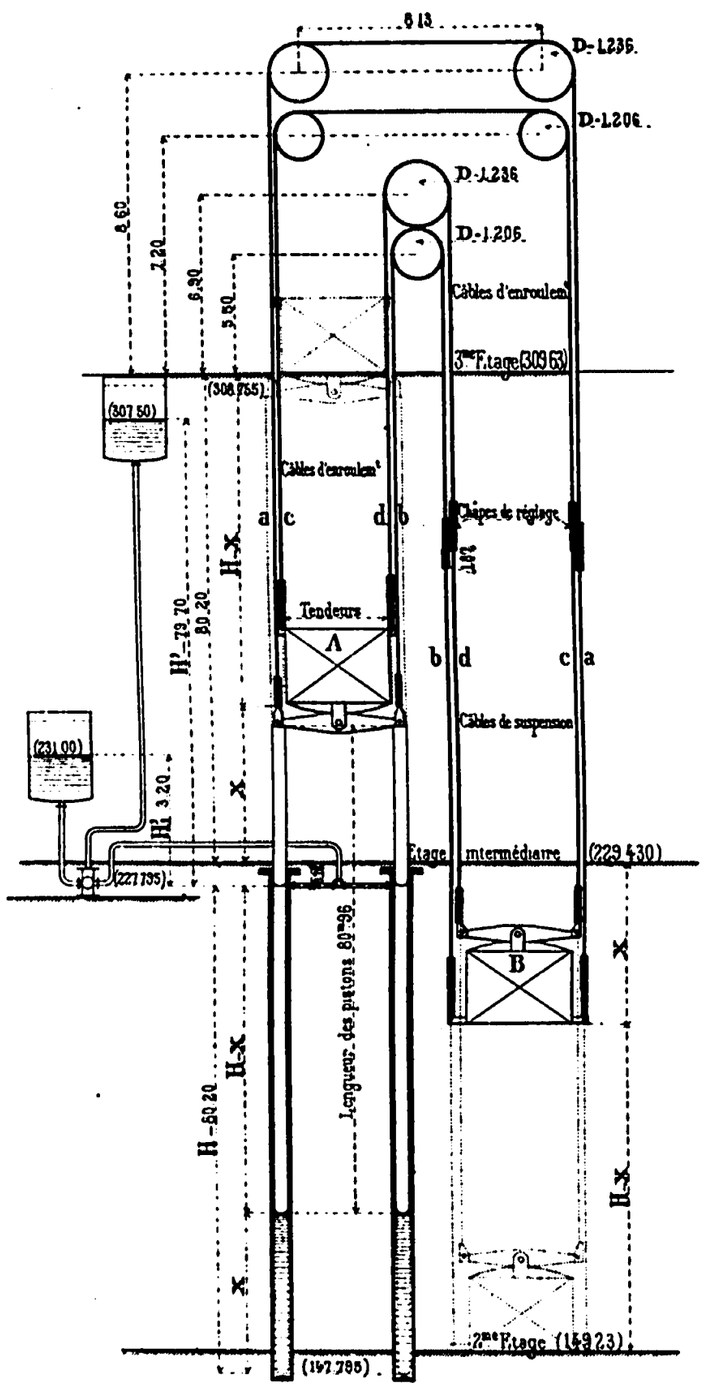


Fig. 178.

Dans le cas où les câbles auraient leur poids correct, soit 20,1 *kg*, la relation (2) donnerait :

$$\frac{10}{S}(H' + H) + P_1 > P + pH + R$$

dans laquelle : $P_1 = 5.818\ kg$, $pH = 6.448\ kg$ et $P = 18.569\ kg$

d'où :

$$H' + H > 127.$$

L'excès sur la pression théorique de 160 *m* étant de 33 *m* environ, la vitesse à l'origine, d'après la courbe, serait de 0,70 *m*.

A la fin de la course, l'excès est de 79,70 — 47 = 32,70, soit 33 *m*, correspondant à une vitesse de 0,73 *m* (courbe de la tête du cylindre). La vitesse augmenterait donc un peu du commencement à la fin de la course, à cause de la diminution de frottement de l'eau entre le piston et le cylindre.

2° Descente.

Dans le cas de la descente et en supposant l'appareil dans la position pointillée de la figure 178, l'intérieur du cylindre aura cessé d'être en communication avec la pression hydraulique venant du réservoir supérieur et il n'est plus en rapport qu'avec le réservoir intermédiaire, dont le niveau moyen est situé à 3,20 *m* au-dessus de la face inférieure du plongeur au haut de sa course. En appelant H'_1 cette nouvelle pression, qui pratiquement s'augmente des pertes de charge qui se produisent depuis le dessous du piston jusqu'au réservoir, on a pour les forces produisant la descente, dans le cas le plus défavorable, c'est-à-dire avec la cabine A vide, et la cabine B pleine :

1° Le poids des pistons et de leur surcharge, $P = 18.547\ kg$.

2° Le poids du câble contrepoids $p\,(H - x)$.

3° Le poids des voyageurs de la cabine motrice V_1.

La force s'opposant à la descente comprendra :

1° Le poids des voyageurs de la cabine contrepoids V_2.

2° Le poids des câbles s'enroulant sur les poulies, px.

3° Le poids des câbles ne s'enroulant pas sur les poulies, $P_1 = 5.802$ (voir p. 175).

4° La contre-pression $\frac{S}{10}(H'_1 + H - x)$.

5° Les résistances passives, qui, dans le cas de la descente, s'élèvent, comme on a vu, à 1.100 *kg*.

On a donc la relation

$$(1) \qquad P + p(H - x) + V_1 > V_2 + px + P_1 + \frac{S}{10}(H'_1 + H - x) + R.$$

Si $x = H$, $V_1 = 0$, $V_2 = 4.000\ kg$, et $p = 19 \times 4 = 76\ kg$

on a :

$$18.547 > 4.000 + 5.802 + 160{,}8\,H'_1 + 1.100 + 6.095$$

d'où

$$H'_1 < 10\ m.$$

Or la hauteur d'eau en dessus du piston est 3,20 *m*, par conséquent il y aura une perte de charge de 7 *m*, qui pratiquement correspond à une vitesse très faible, de 0,35 à 0,40 *m* comme on a vu (chap. IV, § 7).

A fin de course, c'est-à-dire pour $x = o$.

On a :

$$18.547 + 6.095 > 4.000 + 5.802 + \frac{S}{10}(H'_1 + H) + 1.100$$

d'où

$$H'_1 + H < 85\ m.$$

L'excès de cette contre-pression sur la contre-pression théorique est 85 — 83,40 = 1,80 *m*. La vitesse sera donc encore très faible, et d'environ 0,35 *m* comme on a vu (chap. IV, § 8); elle diminue du commencement à la fin de la descente.

Avec un poids de câble égal à 20,1 *kg*, l'équation (4) devient indépendante de *x*. Elle se réduit à :

$$P + pH + V_1 > V_2 + P_1 + \frac{10}{S}(H'_1 + H) + R.$$

Si $V_1 = 0$, $V_2 = 4.000$, $P = 18.569$, $pH = 6.448$ $P_1 = 5.818$ et $R = 1.100$

on trouve :

$$H'_1 + H > 87\ m.$$

Et par suite une perte de charge de 4 *m* environ, correspondant à une vitesse un peu supérieure à 0,35 *m*, qui se maintient à peu près constante pendant toute la course.

Examinons maintenant le cas des cabines équilibrées, c'est-à-dire $V_1 = V_2$ et toujours $C_1 = C_2$. L'équation (1) devient :

$$P + p(H - x) > px + P_1 + \frac{S}{10}(H'_1 + H - x) + R.$$

Pour $x = H$ on a :

$$18.547 > 6.095 + 5.802 + \frac{S}{10}H'_1 + 1.100$$

d'où

$$H'_1 < 34{,}50\ m.$$

La contre-pression théorique étant égale à 3,20 *m*, nous avons donc ici une perte de charge de 31 *m* qui correspond à une vitesse normale.

Pour $x = o$ on trouve :

$$H'_1 + H < 110\ m.$$

Ceci correspond à une perte de charge de 110 — 83,40 = 27 *m*; plus faible que celle précédemment trouvée, elle correspond à une vitesse plus faible.

Cette dernière diminue donc du commencement à la fin de la course, ce qui est conforme à l'expérience.

§ 6. — Calculs de résistance des pièces principales.

1° *Cylindres.* — Chaque cylindre, comme nous l'avons vu, a un diamètre intérieur de 0,36 *m.* Il est formé de tôles d'acier de 10 *mm* d'épaisseur. En admettant que le cylindre soit suspendu par sa tête, vérifions que l'épaisseur de la tôle est suffisante pour résister au poids qui agit sur une section voisine de la tête.

La surface de 1.017 cm^2 est soumise, au maximum, à une pression de 16 *kg* par cm^2, soit à une pression totale de $1.017 \times 16 = 16.272$ *kg*. En y ajoutant le poids propre du cylindre, soit 9.000 *kg*, l'effort total est de $P = 9.000 + 16.272 = 25.272$ *kg*.

Nous avons pour résister à cette traction, à l'endroit des parties filetées où l'épaisseur de la tôle est de 7 *mm*, une section de $1.131 \times 7 = 917$ mm^2.

La fatigue intérieure longitudinale est donc par mm^2

$$R = \frac{25.272}{7.917} = 3{,}2 \ kg.$$

Quant à la rivure, les différentes viroles du cylindre sont réunies par 22 rivets de 20 *mm* de diamètre, donnant une section de 6.908 mm^2. La fatigue dans ces rivets est donc :

$$R = \frac{25.272}{6.908} = 3{,}66 \ kg.$$

En ce qui concerne l'épaisseur de la tôle correspondant aux pressions intérieures, elle se vérifie par la formule de Lamé :

$$e = \frac{D}{2}\left(\sqrt{\frac{R+p}{R-p}} - 1\right)$$

dans laquelle : $\frac{D}{2} = 180$ *mm* désigne le rayon intérieur du cylindre,

p, la pression intérieure par mm^2, soit 0,16 *kg*,

R, la plus grande fatigue admise par mm^2, soit 8 *kg*.

Il vient donc : $e = 180\left(\sqrt{\frac{8{,}16}{7{,}84}} - 1\right) = 180 \times 0{,}02 = 3{,}6$ *mm*.

L'épaisseur de 10 *mm* donne donc une sécurité absolue.

2° *Pistons.* — Chaque piston est formé de tôle d'acier de 8 *mm* d'épaisseur.

Il se termine à sa partie supérieure (Voir tête du piston, fig. 165) par un tenon en acier coulé portant un évidement circulaire de 105 *mm* de diamètre, destiné à donner passage à l'axe d'articulation du palonnier de la cabine A. Cette pièce présente une section à l'endroit de l'évidement égale à 7.440 mm^2.

La plus grande tension se produit au moment où, la cabine B étant pleine et au 2e étage, la descente commence. A ce moment, les forces qui agissent sont :

Cabine B	8.700
Voyageurs	4.000
Câbles d'enroulement du côté de B	6.095
Câbles de suspension, chapes, etc	5.802
Résistance des poulies et des câbles	1.300
Total	25.897
Poids des câbles du côté A	1.047
Reste	24.850 *kg*.

En supposant que les deux câbles du palonnier seuls portent la charge, nous aurons pour effort sur le tenon $\frac{26.650}{2} = 13.325$ *kg*. La fatigue sera donc de $\frac{13.325}{7.440} = 1{,}76$ *kg*.

La section horizontale du piston est de 7.850 mm^2. Le poids du piston étant de 8.250 *kg*, si on le suppose suspendu par la tête, la fatigue du métal sera $\frac{8.250}{7.850} = 1{,}05$ *kg*.

Les viroles qui composent chaque piston sont réunies entre elles par 20 rivets de 18 *mm*, offrant une section totale de 5.090 mm^2. La fatigue sera : $\frac{8.250}{5.090} = 1{,}62$ *kg*.

3° *Câbles d'enroulement et leurs attaches.* — Comme nous l'avons déjà vu, chacun de ces câbles offre une section métallique totale de 1.751 mm^2. La partie la plus fatiguée est celle se trouvant sur les poulies de renvoi, lorsque la cabine B est pleine, au deuxième étage, et que la descente commence. A ce moment, la tension totale est de 25.897 *kg*, soit 26.000 *kg* (voir 2e *Pistons*).

Nous supposerons, comme dans tout ce qui suit, que deux des câbles ou attaches seulement travaillent. La force agissant sur chacun des câbles est de 13.000 *kg* et le travail de $\frac{13.000}{1.751} = 7{,}42$ *kg*.

A cette fatigue vient s'ajouter celle due au passage de ces mêmes câbles sur les poulies de renvoi supérieures. Supposons que les deux câbles portant la cabine soient ceux passant sur les plus petites poulies, qui ont un diamètre d'enroulement de 1.200 *m*.

Les fils composant le câble ont un diamètre de 0,95 *mm*. La fatigue d'incurvation sera donc $20.000 \frac{0{,}95}{1.200} = 15{,}8$ *kg*, soit comme travail total du câble dans le cas le plus défavorable $7{,}42 + 15.80 = 23.22$ *kg*.

Ces câbles sont attachés, d'une part à la cabine motrice A, d'autre part à la chape de réglage.

a) *Attaches à la cabine motrice A.* — Ces attaches comprennent deux chapes mobiles reliant deux des câbles au palonnier, et deux chapes fixes, reliant les câbles aux tendeurs.

Chacune des chapes mobiles est liée au palonnier, par un axe en fer forgé (voir fig. 165) de 105 *mm* de diamètre, offrant une double section de 17.318 mm^2. La fatigue de cisaillement est donc : $\frac{13.000}{17.318} = 0{,}75$ *kg*.

Il est à remarquer que l'axe central du palonnier, ayant les mêmes dimensions que l'axe ci-dessus, et ne portant que le poids des voyageurs et de la cabine, soit 12.700 *kg*, est suffisant, puisqu'il travaille aussi à double section.

La pièce de la chape, formant fourche et réunissant l'axe ci-dessus aux deux fers plats qui comprennent le câble (voir Pl. XXIII[1], fig. 16), présente une section nette minima de $(210 - 44)\,38 = 6.308$ mm^2.

Cette section donne lieu à une fatigue de $\frac{13.000}{6.308} = 2{,}10$ *kg*.

Les branches de la fourche ont une section nette totale de 8.100 mm^2, qui est donc largement suffisante pour résister à la traction de 13.000 *kg*.

Cette pièce est réunie aux deux flasques du câble par 8 rivets de 22 *mm* donnant une double section de cisaillement de 6.080 mm^2, à laquelle correspond un travail de $\frac{13.000}{6.080} = 2{,}14$ *kg*.

Les deux fers plats entre lesquels est rivé le câble ont une section nette totale de $2\,(210 - 40)\,15 = 5.100$ mm^2, répondant à une tension intérieure des fibres de $\frac{13.000}{5.100} = 2{,}55$ *kg*.

Ces fers plats sont réunis à travers le câble par 64 rivets de 10 *mm* offrant une double section au cisaillement de 10.053 mm^2. La fatigue est donc de $\frac{13.000}{10.053} = 1{,}30$ *kg*.

Chapes fixes et tendeurs. — Le bas du tendeur se termine par une pièce plate en fer A (voir fig. 179) percée d'une mortaise qui reçoit un tenon découpé dans la poutre centrale du plafond de la cabine.

Pour empêcher que le tenon ne se sépare de la mortaise, deux équerres doubles

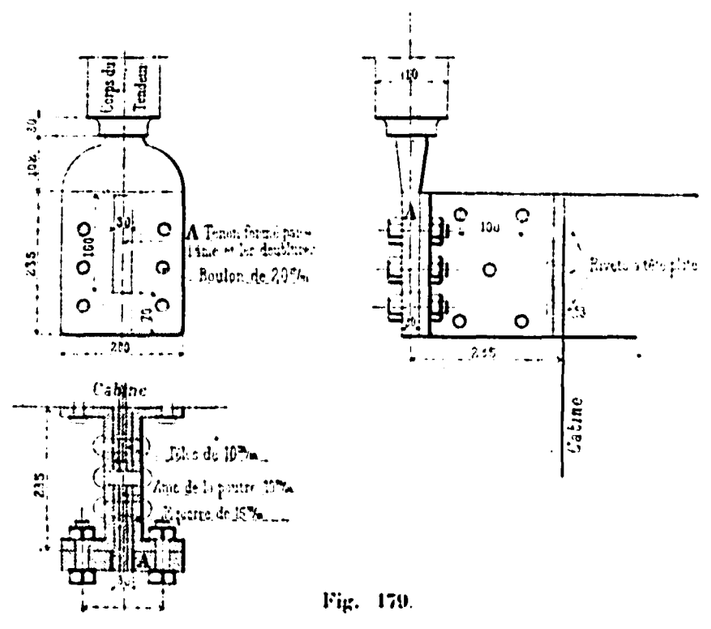


Fig. 179.

de 15 *mm* d'épaisseur réunissent la pièce plate du tendeur à la poutre de la cabine, au moyen de six boulons de 20 *mm*. Au point de vue de la résistance, on ne doit compter que sur le tenon. Celui-ci offre une section au cisaillement de $160 \times 30 = 4.800$ mm^2; son travail est par suite de $\frac{13.000}{4.800} = 2{,}70$ *kg*.

La pièce plate A qui résiste au même effort présente une section nette de $(200 - 30 - 40)\,30$, soit 3.900 mm^2 correspondant à une fatigue de 3,33 *kg*.

La vis du tendeur a un diamètre au fond des filets de 53 *mm* (voir fig. 33 et 34, Pl. XXIII[1]) donnant une section de 2.206 mm^2, et le corps cylindrique creux a une section nette minima de 2.191 mm^2. Ces deux sections correspondent respectivement à des tensions élastiques du métal de 5,89 *kg* et 5,92 *kg*.

Quant à la chape qui réunit les câbles à ces tendeurs, elle est constituée par deux fers plats identiques à ceux de la chape mobile, et percée des mêmes trous de rivets à travers le câble; elle supporte donc la même fatigue de 1,30 *kg* (voir Pl. XXIII[1], fig. 32). Elle est fixée au tendeur par 9 rivets de 23 *mm* travaillant à double section. La fatigue de ces rivets n'est que de $\frac{13.000}{7.470} = 1{,}74$ *kg*.

b) *Attache à la chape de réglage.* — A l'autre extrémité, les câbles d'enroulement sont fixés à la chape de réglage par 64 rivets de 10 *mm*. Or, à cet endroit, la tension totale de 26.000 *kg* est diminuée de la résistance des poulies et des câbles, plus le poids des câbles d'enroulement. Cette tension est par suite $26.000 - 1.300 - 6.095 = 18.605$ *kg*.

La section totale des 64 rivets est donc largement suffisante.

Il en est de même de la section de la chape de réglage qui est la même que celle des chapes ci-dessus.

4° *Câbles de suspension et leurs attaches.* — Chacun de ces câbles a une section métallique totale de 934 mm^2. La plus grande tension qu'il ait à supporter se produit dans la partie supérieure, près de la chape de réglage. En ce point, la tension totale est 18.605 *kg*, diminuée du poids des chapes, soit 18.605 — 1.140 = 17.465 *kg*. En supposant donc toujours que deux câbles seulement supportent la charge, on aura pour chacun d'eux une tension de 8.732 *kg* et une fatigue de $\frac{8.732}{934} = 9{,}34$ *kg*.

Ces câbles sont attachés à la chape de réglage, dans leur partie supérieure, par 48 rivets de 10 *mm*, offrant au cisaillement une double section de 7.540 mm^2. La fatigue qui en résulte est de $\frac{8.732}{7.540} = 1{,}15$ *kg*.

Les attaches à la cabine B sont identiques à celles de la cabine A; elles présentent en général aussi les mêmes sections. Il n'y a lieu que de vérifier la pièce de la chape mobile recevant l'axe du palonnier qui a 80 *mm* de diamètre.

Cette pièce a une section nette de (190 — 80) 50 = 5.500 (voir Pl. XXIII*ter*, fig. 20). La tension générale n'est plus égale ici qu'au poids de la cabine et de ses voyageurs, soit 8.700 + 4.000 = 12.700 *kg*, et par suite à l'attache de la chape mobile, elle est $\frac{12.700}{2} = 6.350$ *kg*, ce qui correspond à une fatigue de la pièce égale à $\frac{6.350}{5.500} = 1{,}16$ *kg*.

Quant à l'axe lui-même, il offre au cisaillement une double section de 10,053 mm^2, ce qui donne un travail des fibres de 0,63 *kg*.

En résumé, la sécurité de l'appareil est largement assurée, surtout si l'on remarque que l'hypothèse de deux câbles seulement supportant la charge est rarement confirmée par la marche de l'appareil.

Il est toujours facile, en effet, de donner au moyen des tendeurs une tension à peu près égale à tous les câbles.

§ 7. — Calculs du parachute hélicoïdal.

Données. — Les données relatives à l'hélice sont : Pas = 445 *mm*, diamètre moyen = 307 *mm*, Circ. = 964 *mm*. Inclinaison Tg α = 445 : 964 = 0,46 ou 25°.

Pour une vitesse verticale de 1,50 *m*, 1,50 × 60 : 0,445 = 200 tours par 1'.

Pour une vitesse verticale de 0,90 *m*, 0,90 × 60 : 0,445 = 120 »

Coefficient de frottement des surfaces hélicoïdales 0,20 à 0,18.

Énergie du parachute. — Le poids de la cabine pleine étant de 12.500 *kg*, et la vitesse maxima de 1,50 *m*, la puissance vive correspondante est de

$$\frac{1}{2} m V^2 = \frac{12.500 \times \overline{1.5}^2}{2 \times 9{,}80} = 1.434 \text{ kgm}.$$

Cette puissance vive doit être absorbée par les deux ressorts Belleville, ce qui correspond à 717 *kgm* pour chacun d'eux.

Chacune des rondelles a un diamètre de 164 *mm*, une flèche de 3 *mm* et une épaisseur de 15 *mm*; elle s'aplatit de 2,4 *mm* sous un effort de 21.000 *kg*.

Chacun des ressorts est constitué par 14 paires de rondelles, pouvant donner sous cet effort une course totale de 28 × 2,4 = 67,2 *mm*.

Le travail mécanique dû à l'aplatissement de chacune des rondelles est de 21.000 × 0,0024 = 50,4 *kgm*, soit pour les 28 rondelles employées, de 1.411 *kgm*. Ce travail est plus que suffisant pour les 717 *kgm* à absorber.

La flèche est donnée par la relation 28 × 21.000 × x = 717 *kgm*, soit x = 1,2 *mm*, c'est-à-dire qu'elle est environ moitié de la flèche limite.

Quant à l'effort, en raison du patinage sur le cône, des grippements qui se produisent et qui absorbent une partie de la force vive, l'effort de 21.000 *kg* lui-même ne sera pas atteint, et dans tous les cas pour le calcul des organes il peut être considéré comme un maximum.

La résistance du frein à la descente, mesurée suivant la verticale, comprend :

1° Le frottement de la vis sur l'écrou qui, suivant la verticale, est égal à

$$\frac{12.500 \times 0{,}18}{\sin 25^\circ} = \frac{12.500 \times 0{,}18}{0{,}423} = 5.343 \text{ kg}.$$

2° Le frottement du cône à emboîtement. Le diamètre moyen du cône est de 154 *mm* et la circonférence moyenne de 484 *mm*; le demi-angle au sommet du cône est donné par sa tangente 9,5 : 75 = 0,126, d'où $\beta = 7°10'$ auquel correspondent les lignes trigonométriques, $\sin\beta = 0{,}125$, $\cos\beta = 0{,}992$.

La pression normale 2N sur les faces du cône est donnée par la formule : $2N = P : \sin\beta + f\cos\beta$ dans laquelle P désigne la force agissant sur le sommet du cône. Comme P = 12.500, on a : 2N = 12.500 : 0,125 + 0,18 × 0,992 = 41.666.

La résistance suivant la génératrice du cône est donc : 41.666 × 0,18 = 7.500 et suivant la verticale elle sera 7.500 × 0,484 : 0,445 = 8.157 *kg*.

La résistance totale du frein à la descente sera donc : 8.157 + 5.343 = 13.500 *kg*.

L'effort moteur étant de 12.500 *kg*, il y aura donc arrêt.

Résistance en marche due au mouvement du parachute. — Le poids de la partie mobile des deux fuseaux est de 620 *kg*, ce qui donne comme frottement sur le grain inférieur 620 × 0,12 = 74,4 *kg*. Comme le diamètre du frottement est de 30 *mm*, et celui de l'hélice de 307 *mm*, le frottement transporté sur l'hélice sera : 74,4 × 30 : 307 = 7,3 *kg*, soit 10 *kg* pour tenir compte des frottements latéraux du tourillon. Ce frottement projeté sur la verticale devient : 10 × 0,964 : 0,445, soit 22 *kg*.

Vitesse du parachute à la descente. — Il y a deux cas à examiner :

1° *Le fuseau porte sur le grain.* — La force accélératrice est de 620 — 22 = 598 *kg*. Sous l'action de cette force accélératrice, la masse du mobile, considérée à son rayon de giration qui est de 0,10 *m*, est, pour un tour du fuseau, descendue sur la verticale de 445 *mm*, et a parcouru sur l'horizontale 2 × π × 100 = 628 *mm*.

La résultante de ces deux mouvements est l'hypoténuse du triangle rectangle construit sur les deux longueurs précédentes, prises pour côtés de l'angle droit. L'angle opposé au côté de 445 *mm* est de 35°20', de sorte que la résultante est 0,628 : cos 35°20' = 0,628 : 0,816 = 0,770 *m*.

La force accélératrice mesurée sur la direction de cette résultante devient : 598 × sin 35°20' = 598 × 0,578 = 346 *kg*.

Écrivons que l'impulsion de cette force f = 346 *kg* est égale à la quantité de mouvement de la masse m = 5,98 : 9,80, on a $ft = mv$.

Pour t = 1, $v = f \times \frac{1}{m} = 346 \times \frac{9{,}80}{5{,}98} = 5{,}67$, vitesse pendant la première seconde ou accélération, qui sur la verticale devient : 5,67 × sin 35°,20' = 5,67 × 0,578 = 3,28 *m*.

L'espace parcouru au bout de la première seconde sera, d'après la formule, $e = \frac{1}{2} j t^2 = \frac{3{,}28}{2} = 1{,}64$ *m*. Au bout de la deuxième seconde, cet espace devient de 6,56. Il suffit donc qu'au démarrage la cabine parcoure dans la première seconde un espace plus petit que 1,64 *m* pour que le contact des cônes ne se produise pas.

2° *Le fuseau porte par ses ailes sur les filets de la colonne.* — La force accélératrice comprend ici le poids des deux fuseaux, 620 *kg*, diminué des frottements latéraux des tourillons évalués à 2 *kg*, et du frottement de l'hélice, 620 × 0,18 = 112 *kg*, soit au total 112 + 2 = 114 *kg*. La valeur de la force accélératrice sur la verticale est donc $620 - 114 \frac{964}{445} = 620 - 247 = 373$ *kg*.

Par les mêmes considérations que ci-dessus, la force accélératrice mesurée sur l'hypoténuse représentant la résultante du mouvement sera :

$$373 \times \sin 35°,20' = 373 \times 0{,}578 = 216 \text{ kg},$$

et la vitesse accélératrice par seconde sera :

$$v = 216 \times 9{,}80 : 373 = 5{,}68 \text{ m},$$

soit 3,28 *m* projetée sur la verticale. Il s'ensuit que l'espace parcouru pendant la première seconde est 1,64 *m*, et pendant les deux premières secondes 6,56 *m*.

Il suffit donc, comme dans le cas précédent, qu'au démarrage la cabine parcoure dans la première seconde un espace moindre que 1,64 *m* pour que le contact des cônes ne se produise pas.

§ 8. — Contrat de fourniture.

L'appareil projeté et installé par M. Édoux, sous sa propre et entière responsabilité, formait l'objet d'un contrat à forfait dont les principales dispositions étaient les suivantes :

1° Cet appareil devait pouvoir élever entre les 2e et 3e étages, distants de 160,40 *m*, un nombre de 63 voyageurs pesant ensemble 4.000 *kg*, à une vitesse moyenne de 0,90 *m* par seconde, de manière à permettre l'ascension, sur la hauteur totale, de 750 voyageurs à l'heure; cette condition correspondait à un nombre de 12 voyages à l'heure.

Dans la réalité, cette vitesse d'ascension a varié, suivant les cas, entre 0,45 *m* et 0,75 *m*; le nombre des voyages a été de 7 seulement, et le nombre des voyageurs transportés n'a pas dépassé 455 à l'heure.

2° Les cylindres de 0,40 *m* environ de diamètre devaient être capables de supporter la pression motrice de 8 atmosphères qui devait être employée.

Dans la réalité, nous avons vu que cette dimension avait été fâcheusement réduite à 0,36 *m*.

3° Les pistons plongeurs de 0,32 *m* de diamètre devaient, sous cette pression motrice de 8 atmosphères, élever la charge indiquée de 4.000 *kg* à la vitesse prévue de 0,90 *m*.

4° Chacun des quatre câbles devait peser 20 *kg* au mètre courant et avoir une section réduite de 2.600 mm^2.

Ils ne pèsent, en réalité, que 18,60 *kg*, et leur section utile est de 1.751 mm^2. En outre, une partie de ces câbles a été remplacée par des câbles dits de suspension ne pesant que 11,30 *kg*.

5° Chacune des pompes devait assurer en marche normale un débit de 22 litres par seconde, soit 136 m^3 par heure correspondant à 12 voyages.

Ces pompes, du système Worthington, ont donné lieu à un très bon service et ont largement assuré les débits prévus.

6° Le prix total à forfait était de 215.000 francs mis en place; les réservoirs seuls étaient en dehors de la fourniture.

Dans ce prix total, celui des pompes Worthington représente environ 30,000 fr.

CHAPITRE V

ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE ET PHARE

§ 1. — **Moteurs et Dynamos.**

L'éclairage de la Tour est assuré par deux moteurs pilon compound, actionnant par courroies deux dynamos Gramme à 6 pôles du type S Marine, de la maison Sautter et Harlé.

Chacun des deux moteurs possède une force nominale de 60 chevaux, mais donne couramment 70 chevaux. Sa vitesse est de 350 tours à la minute. La vapeur est admise à 6 *kg* de pression, et la quantité qui en est consommée par chacun des moteurs est de 640 *kg* à l'heure. Le diamètre du petit cylindre est de 260 *mm* et celui du grand cylindre de 380 *mm*. La course commune est de 200 *mm*. Ces moteurs sont à détente variable pour les deux cylindres, et la distribution est du genre Meyer, ainsi que le système de régulateur.

Quant aux dynamos, chacune d'elles donne 820 à 850 tours par minute, comptés par un tachymètre Bush. Elle peut fournir 600 ampères à 70 volts. Les deux dynamos fournissent donc 1.200 ampères qui, à 70 volts, donnent 84.000 watts correspondant théoriquement à $\frac{84.000}{736} = 115$ chevaux-vapeur, et pratiquement à $\frac{84.000}{660} = 127$ chevaux-vapeur de 75 *kgm*. C'est la puissance électrique totale de la Tour.

Les 6 pôles de la machine sont en fer forgé, et les masses polaires en fonte. L'induit du type Gramme a un diamètre de 0,65 *m* et est formé de 120 spires, qui aboutissent à un même nombre de lames du collecteur, en cuivre rouge. On a adopté l'excitation compound, et le calage des balais est au 1/6.

§ 2. — **Distribution.**

a) *Salle des Machines.* — Des bornes des dynamos, les câbles sont dirigés sur un tableau portant deux commutateurs à deux directions permettant de passer le courant d'un circuit, c'est-à-dire 600 ampères, sur l'une ou l'autre des dynamos; le pôle négatif est commun.

Les deux câbles de chaque circuit viennent ensuite se connecter sur le tableau de distribution. Celui-ci comporte : Deux circuits alimentant le 1er étage, le circuit du phare, le circuit de chaque projecteur et le circuit des machines. Un voltmètre et un ampèremètre permettent de contrôler à chaque instant la force électromotrice et l'intensité, et de s'assurer que les dynamos ne sont pas trop chargées.

b) *1er Étage.* — Les deux circuits principaux qui conduisent le courant au 1er étage sont amenés dans un local spécial et reliés aux bornes de tableaux sur lesquels on a réuni tout l'éclairage de la Tour, sauf la salle des machines et les deux projecteurs.

Toutes les lignes sont munies d'un ampèremètre, d'un coupe-circuit sur chaque pôle et d'un interrupteur. On peut ainsi suivre la marche de l'éclairage et isoler immédiatement la partie qui fonctionne mal, sans

interrompre la lumière des autres locaux. Le voltage des circuits principaux est indiqué par un voltmètre Thomson constamment en circuit.

c) *Appareil de sécurité.* — La consommation totale est indiquée par un ampèremètre enregistreur Richard de 600 ampères. Chaque groupe de lignes réunies sur les tableaux ne peut excéder la puissance d'une machine.

En cas d'accident à l'un ou l'autre des circuits, et afin que l'éclairage des salles du 1er étage soit toujours assuré, l'un des deux circuits a été placé sur un commutateur inverseur. De cette façon, on peut passer à volonté tout l'éclairage sur un circuit ou sur l'autre; au préalable, on a soin de couper plusieurs lignes, de façon à ne pas excéder 600 ampères.

Si un accident se produit aux machines, on coupe les courants au phare, aux projecteurs, au tableau du théâtre, au circuit d'illumination de la salle des fêtes et à la galerie du 1er étage; on passe le courant sur la machine en état et tous les locaux restent seuls éclairés.

§ 3. — Canalisation.

Les câbles sont nus ou isolés et montés sur des isolateurs en porcelaine. Les deux circuits principaux, ceux du phare et des projecteurs, sont montés sur des isolateurs à cloche. Aux machines, les câbles allant du tableau de distribution aux dynamos sont placés sous des moulures et goudronnés; ce surcroît de précaution a été pris pour éviter l'humidité provenant de la condensation de la vapeur ou autres causes. L'isolement ainsi obtenu est parfait.

La section des câbles est calculée de façon que l'intensité n'excède pas 2 ampères par millimètre carré.

L'éclairage de l'ascenseur Combaluzier du pilier Ouest, lequel fonctionne seul le soir, n'a pu être obtenu par les piles Renard et ensuite par des accumulateurs Julien à liquide immobilisé; on a employé une disposition spéciale qui donne depuis trois années toute satisfaction.

Le courant a été amené jusqu'au milieu de la course de la cabine par deux fils immobiles; à ce point, on a connecté un câble souple dont l'autre extrémité est reliée à la cabine et suit le mouvement de cette dernière. Pour assurer la tension de ce câble, on l'a fait passer sur une poulie portée par un petit chariot de 20 *kg* qui roule dans une gaine.

Toute l'installation est montée en dérivation, le potentiel de 70 volts ne permettant pas de monter les arcs par deux en tension.

Le tableau suivant indique la répartition de l'éclairage par locaux.

DÉSIGNATION DES ÉTAGES.	DÉSIGNATION DES LOCAUX.	NOMBRE DE LAMPES							INTENSITÉ LUMINEUSE EN BOUGIES PAR LOCAL.	CONSOMMATION EN AMPÈRES PAR LOCAL.
		A ARC.		A INCANDESCENCE.						
		8A	6A	5L	10L	16L	20L	32L		
Sol.	Pavillon de l'Admn....	»	»	»	16	»	»	»	160	8
	Machines.....	4	»	»	»	»	30	»	3.400	62
	Pilier Ouest	3	»	»	8	»	»	»	2.180	28
	Ascenseur Combaluzier.	»	»	»	2	2	»	»	52	2,6
	Escal. du sol au 1er étage.	»	»	»	»	14	»	»	224	11,2
1er étage	Tableau du théâtre.....	»	»	»	102	»	»	»	1.020	51
	Plate-forme.....	»	16	»	»	»	»	»	8.000	96
	Kiosques.....	»	»	»	10	»	»	»	100	5
	Galeries.....	»	»	»	»	72	»	»	1.152	57,6
	Poste électrique.....	»	»	»	8	»	»	»	80	4
	Restaurant français....	»	»	»	»	»	»	»	»	»
	Grand salon	»	»	»	52	»	»	»	520	26
	2 petits salons.....	»	»	»	16	»	»	»	160	8
	Salon côté pilier Sud...	»	»	»	»	11	»	5	336	16,8
	Salle vestibule pilier Est.	»	»	»	»	»	5	»	100	5
	4 salons particuliers....	»	»	»	16	»	»	»	160	8
	Terrasse.....	»	»	»	»	27	»	»	432	21,6
	Office, cave, cuisine...	»	»	»	21	4	»	»	274	13,7
	A reporter.....	7	16	»	251	130	35	5	18.350	424,5

DÉSIGNATION DES ÉTAGES.	DÉSIGNATION DES LOCAUX.	NOMBRE DE LAMPES							INTENSITÉ LUMINEUSE EN BOUGIES PAR LOCAL.	CONSOMMATION EN AMPÈRES PAR LOCAL.
		A ARC.		A INCANDESCENCE.						
		8A	6A	5L	10L	16L	20L	32L		
1er étage (*suite*).	*Report*.....	7	16	»	251	130	35	5	18.350	424,5
	Restaurant russe.....	»	»	»	»	»	»	»	»	»
	Salle.....	»	»	»	120	»	»	»	1.200	60
	Terrasse.....	»	»	»	»	27	»	»	432	21,6
	Office, cuisine, cave....	»	»	»	4	20	»	»	360	18
	Salle des fêtes.	»	»	»	»	»	»	»	»	»
	Scène.....	»	»	»	64	»	»	»	640	32
	Salle.....	»	»	»	»	80	»	»	1.280	64
	Vestes et loges d'artistes.	»	»	9	34	»	»	»	385	19,2
	Circuit d'illumination..	»	»	»	300	»	»	»	3.000	150
	Brasserie.....	»	»	»	»	»	»	»	»	»
	Salle..... ..	»	3	»	10	»	»	»	1.600	23
	Office, cuisine, cave....	»	»	»	14	»	»	»	140	7
2e étage.	Galerie.....	»	»	»	40	»	»	»	400	20
	Escal. du 1er au 2e étage.	»	»	»	12	»	»	»	120	6
3e étage.	Plate-forme du public..	»	»	»	14	»	»	»	140	7
	Appartem. de M. Eiffel.	»	»	»	8	»	»	»	80	4
	Totaux.....	7	19	9	871	257	35	5	28.127	856,3

L'intensité en ampères du courant nécessaire aux lampes à arcs et aux lampes à incandescence est donc de : 856,3 ampères.

Si nous y joignons le projecteur n° 1. . . . . 100 »

» » » n° 2 . . . . . 100 »

et le phare . . . . . 100 »

Nous arrivons à un total de . . . . . 1156,3 ampères.

lesquels sont fournis par les deux dynamos de 600 ampères.

Le décompte en bougies est le suivant :

7	arcs de 70 carcels.	490×10 bougies	=4.900
19	» 50 »	950×10 »	=9.500
9	lampes à incandescence de 5 bougies.		45
871	» » 10 »		8.710
257	» » 16 »		4.112
35	» » 20 »		700
5	» » 32 »		160
	Total égal au tableau.		28.127 bougies.

§ 4. — Projecteurs.

Les projecteurs, au nombre de deux, sont placés sur la 4^me^ plate-forme. Ils sont du type Mangin, de 90 centimètres de diamètre, adopté pour la défense des côtes. Ils reposent sur un socle à galets et peuvent être déplacés rapidement sur une voie Decauville circulaire, régnant sur le pourtour de la plate-forme (Voir fig. 180).

Ces appareils, ainsi que le phare supérieur, sont établis par la maison Sautter et Harlé.

Chacun d'eux est alimenté par un courant de 100 ampères.

Le miroir réfringent du colonel Mangin, qui a donné son nom aux projecteurs, est limité à la partie antérieure et à la partie postérieure par deux surfaces sphériques ayant un même axe, mais deux centres différents.

La partie postérieure du miroir est argentée, de telle sorte que la lumière projetée par la source, sur le miroir, subit à la fois les effets de la réflexion et de la réfraction, par son passage dans l'épaisseur du verre.

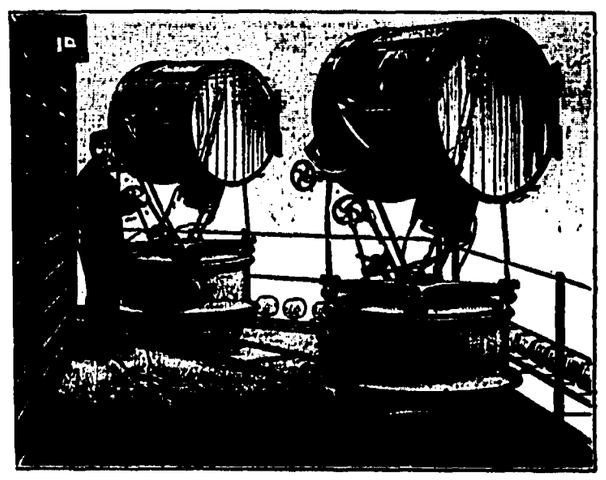


Fig. 180. — Projecteurs.

Le système équivaut à un miroir sphérique, devant lequel se trouverait une lentille sphérique divergente. L'aberration de sphéricité par réflexion du miroir concave peut être corrigée par l'aberration de sphéricité par réfraction de la lentille divergente. Les rayons de courbure des surfaces concaves et convexes du miroir sont déterminés à cet effet.

Chacun des projecteurs est mobile autour d'un axe horizontal ; on peut lui faire décrire un plan principal de la Tour, de sorte que tout point de l'horizon peut être facilement visé. En outre, ils peuvent être orientés dans un plan quelconque. Sur la Tour, l'inclinaison des projecteurs est possible jusqu'à 45°, pour l'éclairage des points avoisinants.

La divergence du faisceau est obtenue simplement en déplaçant le foyer lumineux.

La source électrique de chaque projecteur peut être représentée par une sphère lumineuse de 8 *mm* de diamètre, de sorte que les rayons ne sont point rigoureusement renvoyés suivant une même direction. Ils ont un angle de divergence que l'on peut calculer puisqu'il est égal à l'angle de 1°30′ sous lequel on verrait la sphère si l'on pouvait placer l'œil au sommet du miroir.

Malgré cette divergence, la densité du faisceau est sensiblement la même en partant du centre et en marchant vers les bords. La puissance optique varie donc comme le carré de l'ouverture du miroir.

Si l'on se place dans des conditions d'observation convenable, à l'aide d'une jumelle de nuit on peut distinguer, par un temps clair, les détails des monuments, jusqu'à une distance de 7 à 8 *km*. Tous les monuments de Paris sont visibles; on peut aussi suivre, sur la Seine, des bateaux pendant leur trajet dans Paris.

Il convient également de noter des expériences très intéressantes, faites à l'aide de ces projecteurs par M. Janssen, à l'Observatoire de Meudon, et ayant pour but de déterminer l'absorption des rayons lumineux par la couche d'air traversée.

Afin d'empêcher l'agitation de l'air de troubler mécaniquement la flamme, on a garni les projecteurs d'une glace plane perpendiculaire à l'axe, que les rayons, rendus parallèles, traversent par conséquent sans perte appréciable; mais, comme la quantité de chaleur développée est considérable, cette glace a été partagée en une série de lames indépendantes les unes des autres, de sorte qu'il n'y a point à craindre que l'échauffement considérable qui se produit au foyer entraîne une rupture.

§ 5. — Phare.

Au-dessus des quatre grandes poutres diagonales supérieures se trouve le plancher du phare, qui offre un grand nombre de particularités intéressantes, que nous rappellerons d'après un article publié dans le *Génie civil* par M. Bouquet, ingénieur de la maison Sautter.

Appareil optique. — Le phare est à feu continu et à éclats périodiques. Il est donc constitué par une partie fixe et une partie mobile concentrique à la première, animée d'un mouvement de rotation autour de l'axe du phare.

L'appareil optique fixe est constitué :

1° Par un *tambour dioptrique* de 60 *cm* de diamètre intérieur, comprenant cinq anneaux et du type adopté par l'Administration française pour les phares électriques.

Le foyer lumineux est placé dans l'axe de l'anneau principal, qui est le second dans l'ordre descendant; on n'a pas jugé nécessaire de prolonger le tambour beaucoup au-dessus, l'arc voltaïque à courant continu donnant le maximum de lumière à 40° au-dessous du plan horizontal passant par le centre du foyer.

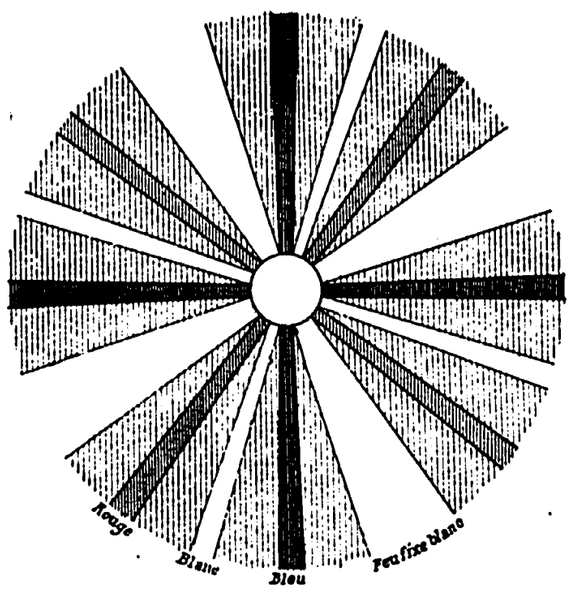


Fig. 181. — Appareil électrique à feu fixe varié par 4 groupes de 3 éclats.

Le tambour envoie sa lumière à l'horizon et il la concentre dans un angle de 1°,5 environ d'ouverture.

2° Par cinq *prismes catadioptriques* calculés de manière à répartir la lumière dans un angle de 12° environ au-dessous de l'horizontale; grâce à ces prismes, le phare peut envoyer ses rayons à 1.500 *m* de la Tour.

Cette disposition de prismes à grande divergence, nécessaire à cause de l'altitude du phare, n'avait pas été employée jusqu'ici; elle serait sans objet pour les phares maritimes qui envoient la totalité de la lumière à l'horizon. Le grand angle de dispersion des rayons (— 12°), qu'il était intéressant d'obtenir pour rendre le phare visible à partir de 1.500 *m*, a donc nécessité le calcul et la taille spéciale des cinq prismes catadioptriques.

L'ensemble que nous venons de décrire constitue un feu fixe, c'est-à-dire un feu éclairant uniformément sur la circonférence entière.

L'appareil mobile, concentrique au premier, est destiné à produire les *éclats*. Il se compose de quatre groupes de trois lentilles verticales (fig. 181); ces lentilles sont *plan-convexes*; elles ont toutes la hauteur de l'optique fixe et elles concentrent la lumière en augmentant son intensité dans la proportion de $\frac{1}{7,68}$, soit huit fois environ.

La coloration des éclats est produite par des verres colorés placés devant les lentilles verticales. La succession des éclats est la suivante : éclat rouge, éclat blanc, éclat bleu, feu fixe blanc, éclat rouge, éclat blanc, etc. C'est à la couleur blanche que correspond l'intensité maxima.

Ces lentilles sont fixées sur un tambour mobile qui fait le tour de l'optique fixe en 90 secondes environ; le mouvement de rotation lui est communiqué par un petit moteur électrique placé à la partie supérieure et actionnant à l'aide d'un pignon une roue dentée fixée au tambour mobile.

L'énergie très faible que consomme le moteur (0,5 ampère à 50 volts, soit 25 watts), est prise en dérivation sur le circuit de la lampe; un rhéostat intercalé sur la dérivation permet d'ailleurs de régler la vitesse du moteur et par suite la durée des éclats.

Intensités lumineuses des rayons du phare à des distances variables de la Tour. — La lampe à arc voltaïque placée au centre du phare est alimentée par un courant de 100 ampères et fournit une intensité lumineuse de 5.500 carcels environ.

Le pouvoir amplificateur du tambour dioptrique est de 13; l'intensité lumineuse du phare, c'est-à-dire la lumière envoyée à l'horizon est donc de :

$$13 \times 5.500 = 71.500 \text{ carcels environ.}$$

Dans les anneaux catadioptriques, la lumière est répartie inégalement et de telle façon que les différentes régions éclairées reçoivent une intensité lumineuse de plus en plus grande à mesure qu'on s'éloigne de la Tour.

La courbe B de la figure 182 indique la répartition, dans un plan vertical, de la lumière transmise par ces cinq anneaux catadioptriques; les rayons émis sous le plus grand angle avec le plan horizontal rencontrent le sol aux points les plus rapprochés de la Tour dans la région éclairée et sont les moins intenses. A mesure que l'inclinaison des rayons émis diminue, c'est-à-dire qu'ils viennent rencontrer le sol à une plus grande distance de la Tour, leur intensité augmente; il en est ainsi jusqu'à une distance de 5.347 *m* de l'axe de la Tour, à partir de laquelle ce sont les rayons émis par le tambour dioptrique qui commencent à éclairer; l'intensité lumineuse croît alors rapidement jusqu'à sa valeur maxima à l'horizon, qui est de :

70.000 carcels environ pour le feu fixe.
540.000 » » pour les éclats.

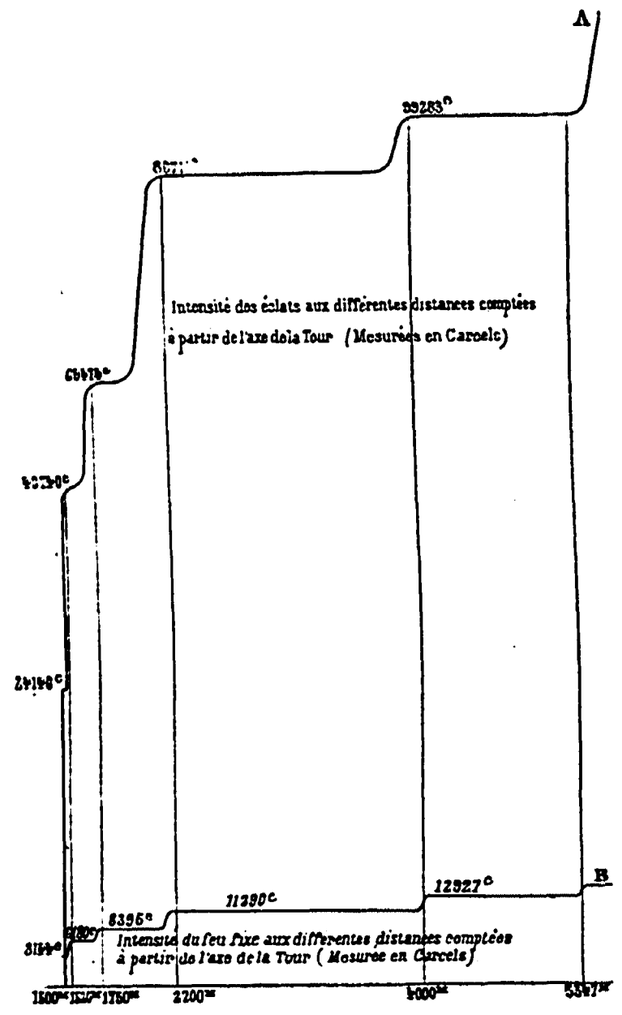


Fig. 182. — Répartition et intensité de la lumière transmise par le phare.

La *première zone*, éclairée de 1.500 à 1.520 *m*, passe derrière l'École militaire, l'avenue Lowendal et la place de Fontenay, au coin de l'avenue de la Tour-Maubourg, traverse l'avenue Montaigne, l'avenue de l'Alma au coin de la rue Pierre-Charron, rase le lycée Janson et passe à la place de Passy.

La *deuxième zone*, de 1.520 à 1.750 *m*, passe sur le dôme et l'esplanade des Invalides, au pont des Invalides, à la rue et place François I^er^, à la place d'Eylau, à l'église Saint-Honoré, à la rue de la Pompe à Passy, au pont de Grenelle.

La *troisième zone*, de 1.750 à 2.200 *m*, est limitée par un arc de cercle qui passe au palais Bourbon, traverse les Champs-Élysées au Cirque d'Été, coupe la rue de la Boëtie, entame l'avenue Friedland, passe à la place de l'Étoile à l'origine de l'avenue Wagram, coupe l'avenue du Bois-de-Boulogne, près la porte Dauphine, rase les fortifications, traverse le parc de la Muette, le quartier de Grenelle à la mairie du XV^e^ arrondissement, le puits de Grenelle, le ministère du Commerce, et arrive enfin à l'angle du ministère de la Guerre.

La *quatrième zone*, de 2.200 à 4.000 *m*, est limitée par un cercle qui traverse la cour du Louvre, le centre du Palais-Royal, le boulevard des Italiens à l'angle de la rue du Helder; passe derrière l'Opéra, place Tivoli, boulevard des Batignolles, derrière le collège Chaptal, place Wagram, sort de Paris à la porte de

Courcelles pour y rentrer au Point-du-Jour, en ressort pour y rentrer encore à la porte de Plaisance, traverse Vaugirard par la rue de Vanves, le cimetière Montparnasse, le jardin et le palais du Luxembourg, le coin de la Monnaie, où il traverse la Seine.

La *cinquième zone* est limitée à 5.347 *m* par un cercle passant au pont Saint-Louis, à la caserne Lobau, à la rue du Temple, au croisement des rues Turbigo et Saint-Martin, au théâtre de la Renaissance, au square Montholon, à l'avenue Trudaine; il sort de Paris à la place Clichy, traverse Clichy, Courcelles et rejoint la Seine au pont de Neuilly. Il rentre à Paris par Issy, Vanves, Malakoff et la porte de Montrouge, et vient à la Seine en traversant le boulevard Arago, le boulevard Port-Royal, la rue Monge au coin de l'École polytechnique.

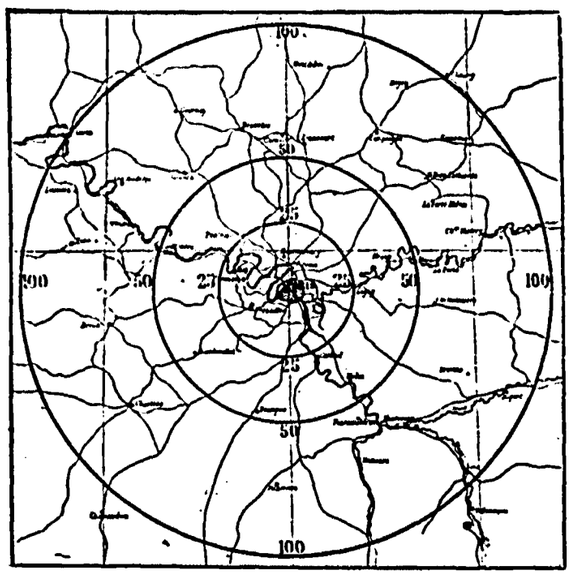


Fig. 183. — Points extrêmes d'où le phare de la Tour est visible.

La courbe A donne les intensités lumineuses des éclats correspondants aux cinq anneaux catadioptriques dans les cinq régions précédentes.

L'intensité lumineuse des rayons émis à l'horizon par le tambour dioptrique étant de 70.000 carcels, cette intensité devient dans les éclats, dont le pouvoir amplificateur est, avons-nous dit, de 7,68, 540.000 carcels environ.

Pour 500.000 carcels, la portée du feu par un temps clair serait de 203 kilomètres ; mais la sphéricité du globe limite beaucoup la portée géographique. A la cote 300 *m* de la lanterne de la Tour, cette portée est de 70,2 *km* seulement. En tenant compte de la réfraction, un observateur placé à la cote de 300 *m* peut voir le phare au maximum à 141,2 *km*.

Les observations faites jusqu'ici et rapportées par la Presse, indiquent comme points d'où le phare est visible (fig. 183) : Chartres (75 *km*) ; Fontainebleau (60 *km*) ; Provins (77 *km*) ; Orléans (112 *km*).

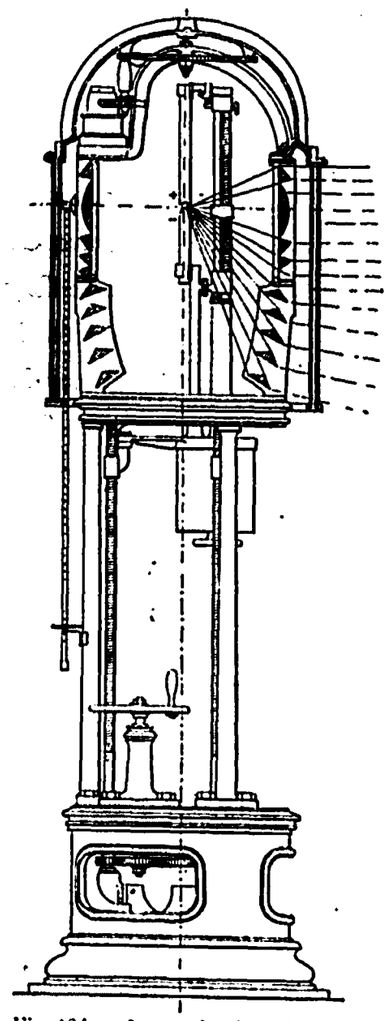


Fig. 184. — Lampe du phare de la Tour.

Lampe à arc (Voir fig. 184). — La lampe du phare est du type mixte automatique ou à la main, pour un courant de 100 ampères. La manœuvre se fait par le bas de l'optique ; trois tiges filetées commandées par un volant et des engrenages permettent d'élever ou d'abaisser la lampe.

La mise au foyer de l'arc voltaïque s'obtient par un prisme lentille, à réflexion totale, placé suivant l'axe optique du tambour, mais en dehors. L'image des charbons vient se projeter sur un écran disposé à hauteur de la vue pour le gardien du phare ; un repère permet d'amener l'image exactement au point, c'est-à-dire l'arc au foyer.

Ajoutons enfin que le phare de la Tour a, par sa position et sa puissance, la portée maxima de tous les phares du monde.

CHAPITRE VI

MACHINES ET CHAUDIÈRES

Comme nous l'avons vu, les ascenseurs sont mus par l'eau sous pression. Cette eau provient de réservoirs qu'alimentent directement des pompes installées au pied de la Tour.

Toutes les installations mécaniques, chaudières, machines à vapeur, pompes, dynamos, etc., ont été réunies dans le sous-sol de la pile n° 3 (Sud), spécialement aménagé à cet effet (voir Pl. XX et XXI).

§ 1. — Quantité d'eau à fournir aux ascenseurs du 1er et du 2me étage.

Les ascenseurs Roux, Combaluzier et Lepape, ainsi que les ascenseurs Otis, sont desservis par deux réservoirs cylindriques de 3 *m* de diamètre et 7 *m* de longueur, installés au 2me étage de la Tour, et dont la capacité est de 46,339 m^3, soit, pour les deux, 92,678 m^3. Ces réservoirs sont reliés entre eux par un tuyau en tôle de 0,50 *m* de diamètre, duquel partent les 4 conduites aboutissant à chacun des cylindres de ces ascenseurs.

Les ascenseurs Roux, Combaluzier et Lepape dépensent 8,746 m^3 d'eau sous pression par ascension ; comme chacun peut exécuter 10 voyages à l'heure, il faut que les pompes fournissent pour ces ascenseurs $2 \times 8{,}746 = 17{,}492$ m^3 en 6 minutes, soit 2,915 m^3 par minute.

Un ascenseur Otis dépense 7,92 m^3 par ascension, et comme chacun des deux peut exécuter 9 ascensions par heure (sans arrêt au 1er étage), il faut que les pompes fournissent, pour ces ascenseurs, $2 \times 7{,}92 = 15{,}84$ m^3 en 6′,40″, soit $\frac{15{,}84 \times 60}{400} = 2{,}38$ m^3 à la minute.

Les pompes dénommées pompes Quillacq, qui alimentent les deux réservoirs du 2me étage, doivent donc fournir à a minute $2{,}91 + 2{,}38 = 5{,}29$ m^3.

§ 2. — Pompes Quillacq.

Ces machines et pompes ont été étudiées par M. Meunier, ingénieur civil, et construites par la Société anonyme d'Anzin, représentée par M. A. de Quillacq. Elles sont au nombre de deux et composées comme suit :

Les machines à vapeur sont du type Weelhock, avec pompes Girard en prolongement de la tige du piston moteur ; elles sont à double effet et à pistons plongeurs.

Chaque pompe élève un volume de 50 *l* à la vitesse de 22 tours et demi par minute et 80 *l* à la vitesse de 36 tours.

La hauteur d'élévation est de 120 *m*.

Les machines sont à condensation par mélange. D'après le marché, l'introduction de vapeur se fait normalement pendant 1/7 de la course sous une pression initiale de 6,3 *kg*, soit 7 *kg* aux générateurs.

Dans ces conditions, la consommation ne doit pas dépasser 11,6 *kg* de vapeur sèche par cheval-heure, mesurée en eau montée.

Le bâti à baïonnette porte le cylindre de 650 *mm* de diamètre, et 1,066 *m* de course avec piston, tige, enveloppe de vapeur, organes de distribution et de détente, enveloppe en bois à l'extérieur du cylindre.

Le régulateur à force centrifuge agit directement sur la détente, et le volant assure une régularité de marche suffisante à la vitesse maxima de 22 tours et demi.

La pompe à air est commandée par une manivelle disposée à l'extrémité de l'arbre, du côté du volant; le diamètre de la pompe à air est de 350 *mm* et la course de 400 *mm*; elle est munie de clapets en caoutchouc et d'un indicateur de vide.

La bâche à eau chaude est fermée; elle est surmontée d'un tuyau permettant de surélever l'eau à 1,50 *m* au-dessus de l'axe de la pompe à air.

La pompe alimentaire, de 90 *mm* de diamètre et de 250 *mm* de course, fait corps avec la pompe à air.

La machine actionne directement, par la tige prolongée de son piston à vapeur, une pompe horizontale à double effet et à piston plongeur, système Girard. Le diamètre du plongeur est de 290 *mm* et sa course de 1,066 *m*.

La pompe débite donc par tour $\frac{2\times 1{,}066\times\pi\times 0{,}29^2}{4}=0{,}140$, soit 140 litres. Or, nous avons vu que les ascenseurs exigeaient 5,29 m^3 par minute. Une seule pompe suffirait donc, à la rigueur, en marchant à 36 tours, puisqu'elle donnerait $140\times 36=5.040$ *l*. Quand elles marchent toutes les deux à la vitesse de 22 tours et demi, elles donnent $2\times 140\times 22{,}5=6.300$ *l*. Le service est donc largement assuré, puisqu'avec une seule pompe on peut à peu près suffire aux besoins maxima.

Cette pompe se compose de son piston en fonte avec sa tige en acier, de deux corps de pompe en fonte à larges patins assemblés solidement entre eux. Les quatre boîtes à clapets sont en fonte; les clapets sont garnis de laiton et de cuir et sont munis de ressorts en acier. Les deux tuyaux d'aspiration sont verticaux; la culotte de refoulement est en fonte, et le réservoir d'air, de 1 m^3 de capacité, est en tôle d'acier et monté directement sur la pompe; il est muni d'une tubulure de sortie d'eau de 250 *mm* de diamètre, d'un manomètre métallique, d'un tube de niveau d'eau avec ses robinets, de deux robinets de remplissage et d'amorçage de corps de pompe et de deux robinets de purge d'air.

Les procès-verbaux d'essai ont montré que les pompes pouvaient régulièrement fonctionner de 25,3 tours à 36,36 tours à la minute, avec une élévation de 124 *m*; que leur rendement variait de 0,92 à 0,95, et que la dépense de vapeur sèche par cheval-heure mesurée en eau montée était de 11 *kg*, chiffre inférieur à celui du marché, qui stipulait 11,60 *kg* comme limite maxima.

L'eau d'échappement des cylindres des 4 ascenseurs se rend, par des conduites souterraines, à un réservoir où les pompes la puisent pour la refouler à nouveau dans les réservoirs du 2^{me} étage. Ce réservoir, établi dans l'angle Est du sous-sol de la pile 3, a une profondeur de 2 *m*; il est recouvert par un plancher en fer constitué par une tôle striée placée sur ses solives.

Chacune de ces machines a une force de 111 chevaux à la vitesse moyenne de 31,6 tours, donnant un débit réel par seconde de 67,56 *l* ou par minute de 4.054 *l* d'eau, montée à la hauteur de 124 *m*.

Ces deux machines ont été payées 60.000 *fr.* soit 30.000 *fr.* chacune, rendues à pied-d'œuvre; dans ce prix n'est pas comprise la tuyauterie, non plus que les frais de montage, effectué par nous sous la surveillance d'un chef monteur de la maison Quillacq.

§ 3. — Pompes Worthington.

L'ascenseur Edoux est desservi par un réservoir de 3 *m* de diamètre et de 4 *m* de hauteur, installé à la troisième plate-forme, et dont le cube est de 28 m^3.

Ce réservoir est alimenté par deux pompes Worthington, comprenant chacune deux cylindres à double effet, qui prennent l'eau du réservoir de décharge installé sur la plate-forme intermédiaire, de sorte qu'en somme elles n'ont à la refouler qu'à une hauteur de 80 *m*. Ces pompes sont actionnées directement par des machines compound avec cylindres en tandem.

Leur diamètre est de 0,195 *m* et leur course de 0,340 *m*. Le volume d'une cylindrée est de 10,166 *l* pour une surface de piston égale à 299 cm^2; quand les deux pompes marchent simultanément, le nombre des cylindrées par tour est de 8, et le volume est de 81 *l* environ. En bonne marche normale, le nombre des tours est de

30 par minute. Le cube d'eau par minute est de 2.430 *l*, soit en quantité effective, et pour un rendement de 90 p. 100, 2.200 *l* environ par minute.

Or, l'ascenseur Edoux, dont le piston plongeur a 0,32 *m* de diamètre et 80,20 *m* de course, dépense par voyage 0,0804×2×80,20 = 12.896 *l*; les pompes marchant pendant 6 minutes fournissent donc la quantité d'eau nécessaire pour un voyage. Elles permettent donc de faire 10 voyages à l'heure, ainsi que nous nous en sommes assurés par des expériences directes. Ce rendement est au-dessus des besoins pratiques; par suite de circonstances indiquées plus haut, on n'en peut effectuer que 7. On peut même, en faisant marcher une seule pompe, exceptionnellement à 35 tours, faire fonctionner l'ascenseur pour ce nombre de voyages. Le service de ces pompes, qui ont toujours parfaitement fonctionné sans aucun arrêt, assure donc très largement celui de l'ascenseur.

Nous avons relevé, pour la vitesse de 30 tours, les pressions manométriques, sur le tuyau de refoulement et sur celui de l'aspiration, pour en déduire les pertes de charge dues au mouvement de l'eau dans ces tuyaux.

Le manomètre placé près des pompes, sur le tuyau de refoulement, a accusé une pression de 285 *m* d'eau. Or, la cote de ce manomètre était 30,50+2,00=32,50. La cote moyenne du niveau de l'eau dans le réservoir supérieur est de 307,50 *m*. Elle excède donc celle du manomètre de 307,50—32,50=275 *m*. La perte de charge dans le tuyau de refoulement est donc de 285—275=10,00 *m*.

Le manomètre du tuyau d'aspiration, situé à la même cote que celui du refoulement, a donné une pression en mètres d'eau de 190 *m*. Or, la cote du niveau de l'eau dans le réservoir intermédiaire est de 229,83 *m*. La différence avec celle du manomètre est donc 229,83—32,50=197,33 *m*. Et la perte de charge pour l'aspiration est par suite de 197,33—190=7,33 *m*.

Ces deux pertes de charge, soit de 10 *m* pour le refoulement et de 7,33 pour l'aspiration, augmentent d'autant la fatigue des pompes, mais elles restent dans des limites très acceptables.

Nous n'avons pas le prix de ces pompes, qui étaient comprises dans le forfait de l'ascenseur Edoux; mais il doit être d'environ 30.000 fr.

§ 4. — **Machines diverses.**

La salle des machines renferme encore les dynamos et leurs moteurs, que nous avons déjà décrits au sujet de l'éclairage électrique, et sur lesquels nous ne reviendrons pas, ainsi que la pompe Worthington, d'une force de deux chevaux, puisant, dans un réservoir spécial branché sur un compteur de la ville, l'eau de source indispensable aux restaurants et aux bars du 1er étage et l'élevant dans les réservoirs de cet étage.

§ 5. — **Générateurs Collet-Niclausse.**

La vapeur nécessaire à ces différentes machines est fournie par une batterie de 4 chaudières multitubulaires à vaporisation rapide, du système Collet-Niclausse.

Ces chaudières ont chacune une surface de chauffe de 80 m^2 et une surface de grille de 3 m^2. Elles sont timbrées à 12 *kg* et développent par heure, en marche normale, 1.500 *kg* de vapeur sèche à la pression maxima, soit 6.000 *kg* pour les quatre.

La consommation de charbon garantie, sur la grille, est de 1 *kg* pour 8,5 *kg* de vapeur sèche produite à la pression de 12 *kg*.

Trois de ces chaudières, qui représentent 150 chevaux-vapeur chacune, suffisent en marche normale, la quatrième faisant réserve.

Chaque générateur se compose de 98 tubes vaporisateurs de 100 *mm* de diamètre et 2,250 *m* de longueur, et de 10 tubes sécheurs de 128 *mm* de diamètre et 1,50 *m* de longueur. A l'intérieur de chaque tube vaporisateur est placé un tube directeur de 60 *mm* de diamètre, et un tirant en fer de 20 *mm* maintenant des bouchons de nettoyage aux deux extrémités des tubes.

Le faisceau tubulaire débouche à l'avant dans 7 collecteurs verticaux, munis de leurs cloisons séparatrices

tives. Ces collecteurs sont fixés, au moyen de joints coniques, sur le réservoir supérieur de 900 *mm* de diamètre et de 2 *m* de longueur, lequel est muni d'un niveau d'eau, d'un clapet de retenue d'alimentation, d'une soupape de sûreté, d'un manomètre et des robinets de jauge.

Les générateurs sont établis par groupe de deux avec leur maçonnerie enveloppe et les carneaux à l'arrière, jusqu'au nu intérieur du mur actuel qui limite la chambre destinée à la machinerie; une porte en tôle ferme l'espace entre les deux groupes de générateurs, sur l'avant des deux portes de visite du carneau d'arrière.

Ces chaudières sont alimentées par des pompes alimentaires (système Worthington), l'une faisant rechange de l'autre.

Le fonctionnement de ces chaudières n'a jamais rien laissé à désirer.

Leur prix total est de 52.000 *fr.*, complètement installées, y compris le massif en béton qui les supporte.

§ 6. — Conduite de fumée et cheminée.

Ces chaudières, accolées ainsi deux par deux sur la face côté Seine, réunissent leurs fumées dans un carneau collecteur voûté de 116,23 *m* de longueur placé dans le sol (Pl. III, fig. 2), ayant 1,30 *m* de largeur et 1,70 *m* de hauteur à la clef. Ces dimensions correspondent à une section de 2,02 m^2, égale environ au quart de la surface de grille de trois des chaudières marchant simultanément. Cette conduite est munie de deux regards pour la visite et l'entretien. L'un est placé près des chaudières, et l'autre vers le milieu du parcours.

Le carneau vient déboucher dans une cheminée en brique, dissimulée à droite de la pile 4 (Ouest) (Pl. IV, fig. 15 à 22).

Primitivement, cette cheminée mesurait 17,23 *m* au-dessus de ses fondations, ce qui correspondait à une hauteur de tirage, entre les chaudières et la sortie de la cheminée, de 15,54 *m*. Comme cette hauteur était un peu faible, malgré le grand diamètre de sortie qui est de 1,69 *m*, on avait installé un ventilateur actionné par un moteur à gaz, et refoulant de l'air dans la conduite pour activer le tirage. Aujourd'hui, ce ventilateur a été supprimé, et la cheminée a été exhaussée de 1,50 *m*, ce qui donne une hauteur de tirage de 17,04 *m*. Cette hauteur est suffisante, et la cheminée a un bon tirage. Il faut remarquer, du reste, que sa section de sortie, soit 2,01 m^2, correspond aussi, à peu près, au 1/4 de la surface des trois grilles, qui est de 9 m^2.

La cheminée actuelle repose sur un massif de béton de 0,80 *m* d'épaisseur. Elle est construite en trois tronçons d'épaisseurs différentes, et qui ont comme hauteur, en partant de la base, 5,00 *m*, 6,13 *m* et 7,60 *m*. L'épaisseur de la cheminée à la sortie est de 0,35 *m*, à la base elle est de 0,70 *m*.

Le prix de la cheminée est de 3.500 *fr.*, et celui du carneau de 13.500 *fr.*

§ 7. — Soute à charbon.

La soute à charbon (Pl. XXI) est placée dans l'angle Ouest du sous-sol; on la remplit par une porte placée sur le côté Grenelle; une voie Decauville permet ensuite d'amener le combustible dans la chambre de chauffe.

§ 8. — Alimentation d'eau.

La vapeur provenant des machines est envoyée dans des condenseurs à mélange alimentés par de l'eau de l'Ourcq ou de l'eau de Seine prises au compteur; le refoulement a lieu dans un réservoir placé à proximité des chaudières; une partie de cette eau, dont la température est d'environ 42°, sert à l'alimentation des chaudières au moyen de deux petits chevaux Worthington. L'excédent est évacué à l'égout.

La conduite de vapeur qui alimente les différentes machines est continue et fait le tour du sous-sol; sur elle se branchent les différentes prises de vapeur (Pl. XXI).

CHAPITRE VII

POIDS ET PRIX DE REVIENT

§ 1. — **Ascenseurs Otis.**

a) Poids d'un ascenseur.

Fourni par la Société Otis :

Cylindre hydraulique	20.000 *kg*	
Pistons, tiges et leur support	4.500	
Chariot des poulies voyageuses	10.000	
Distributeurs et leviers de manœuvre	800	
Tuyaux de circulation et distributeur supérieur	1.500	
Poulies fixes du mouflage, arbres et paliers	4.200	
Poulies de renvoi supérieures et paliers	6.300	
Chariots de contrepoids, galets et appareil de sûreté	4.500	
Châssis des cabines et galets	4.500	
Appareils de sûreté de ce châssis	1.500	
Poulies auxiliaires et partie fixe du contrepoids	1.200	
Mécanismes divers et appareils de manœuvre	5.750	64.750 *kg*

Fourni par divers :

Poutres de support des cylindres	27.362 *kg*	
Appuis des poutres de support	3.952	
Supports en fonte des cylindres	1.773	
Poulies automatiques et de guidage	8.881	
Poulies diverses	4.636	
Rails de la voie	13.389	
Coussinets de la voie	3.475	
Réservoir rectangulaire au pied de l'ascenseur	1.285	
Grand réservoir cylindrique du 2e étage	3.471	
Canalisation spéciale	734	
Câbles	2.750	
Supports des galets	1.009	
Contrepoids en fonte	16.192	
Riblons	5.680	
Bennes d'approvisionnement et leurs chaînes	1.032	
Tuyauterie en cuivre	250	
Canalisation générale	9.000	
Caisse de cabine	5.000	109.859
Poids total d'un appareil		174.609 *kg*

b) Prix de revient pour deux appareils.

NOM DU FOURNISSEUR	DÉSIGNATION DE LA FOURNITURE	POIDS	PRIX	SOMMES PARTIELLES	SOMMES TOTALES
		Kg	*Fr.*	*Fr.*	*Fr.*
Société Otis.....	Cylindres, pistons, chapes, poulies voyageuses, poulies auxiliaires, poulies principales, appareils de sûreté, bâtis des cabines.				
	Le tout à forfait.....	»	»	137.113,65	
	1 distributeurs à 4.445 *fr*.....	»	»	16.580 »	
	80 *m* de rails en acier.....	129.500	»	512,40	
	2 appareils de manœuvre.....	»	»	1.537,22	155.743,27
Chantiers de la Loire...	28 appareils pour poulies automatiques.....	12.642	1,15	14.538,30	
	52 poulies de guidage et pièces diverses.....	5.120	1,15	5.887,91	20.426,21
Darnay.....	52 poulies de 0,38 et leurs supports.....	4.162	1,10	4.578,20	
	4 poulies de renvoi de 0,80 avec arbres et clavettes.....	383	1,10	421,30	
	8 paliers, coussinets et boulons.....	122	1,10	134,75	
	12 poulies de renvoi des câbles principaux.....	1.129	1,10	1.241,90	
	Plaques de poulies et boulons.....	819	»	490,87	
	12 poulies de renvoi des câbles de contrepoids.....	1.186	1,10	1.304,60	
	2 appareils de support et de guidage des câbles de manœuvre.....	335	»	335 »	
	Boulons et plaques d'appui des piliers des poulies du deuxième étage.....	1.118	»	698,80	
	Appuis des poutres principales et coussinets en fonte de la voie du chariot mobile.	7.843	»	1.686,25	
	Boulons divers.....	61	»	61,20	
	Supports en fonte des cylindres et tiges des pistons.....	3.545	»	1.631,57	
	Coussinets en fer forgé et clavettes de la voie des cabines.....	4.794	»	5.347,20	
	Coussinets de la voie du chariot mobile.....	1.218	»	702,55	
	Coussinets et autres pièces de rechange pour la voie principale.....	418	1,20	501,60	
	Coussinets en fonte pour la voie du contrepoids.....	520	21,50	118,80	
	Un réservoir rectangulaire et sa charpente.....	2.570	»	1.156,50	
	Un réservoir cylindrique en tôle.....	6.941	57	3.956,15	
	Canalisation commune, supports et étriers de tuyaux.....	1.467	»	990,20	
	Frais de pose de la canalisation.....	»	»	276,69	
	Chaîne des bennes.....	65	»	130 »	25.764,13
Compagnie du matériel des Chemins de fer...	Deux cabines à deux étages.....	10.000	»	»	18.178 »
Châtillon et Commentry.	18 câbles.....	5.500	»	9.290,65	
	Partie des câbles de rechange (solde à la charge de la Société).....	»	»	5.310,10	14.600,75
Martin, du Mans.....	Contrepoids.....	32.364	10,35	»	3.349,67
Gouyer.....	Tuyauterie en cuivre.....	500	»	»	2.301,95
Ateliers de Levallois...	Poutres de support des cylindres et du chariot mobile.....	51.723	43,60	21.114,30	
	Supports de galets.....	2.017	»	794,72	24.909,02
Guyenet.....	Bennes d'approvisionnement.....	2.000	»	»	1.253,15
Salles, Aubagnac et C^ie^.	Griffe en fer de Suède.....	18	»	»	176,00
Aciéries de France.....	Rails en acier des voies de la cabine et du contrepoids.....	26.778	15	»	4.016,70
Gibault.....	Canalisation : 1° Conduites en fonte de 0,25 *m*, amenant les eaux d'évacuation des cylindres hydrauliques dans le réservoir général de la pile 3, y compris fouilles et tous raccords accessoires..... 3.807 *fr.*				
	2° Conduites de la distribution d'eau dans les ascenseurs, en tôle de 6 millim. d'épaisseur.				
	a. Une conduite de 0,25 *m*, allant de la pile 3 au réservoir du 2^me^ étage, longueur : 126 *m*, plus une bifurcation de 33 *m*.				
	b. Une conduite de 0,500 *m*, reliant les deux réservoirs, longueur : 16 *m*.				
	c. Une conduite de 0,25 *m*, se rendant à chacune des piles, longueur : 152,50 *m*.				
	d. Robinets équilibrés et vannes des conduites.				
	Le tout à forfait pour une somme de..... 33.000 *fr.*				
	Soit pour l'ensemble de la fourniture..... 36.807				
	Dont la moitié à répartir entre les ascenseurs Otis et Combaluzier (poids approximatif).....	18.000	»	18.403,50	
	Frais de pose des réservoirs et canalisations payés par le chantier. Dépense totale : 4.105,90 *fr.*, dont moitié aux ascenseurs Otis.....	»	»	2.052,95	20.456,45
Divers.....	Fret et frais de déchargement.....	»	»	9.718,80	
	Assurances maritimes.....	»	»	687,96	
	Douane.....	»	»	8.697,71	
	Transport par chemin de fer et camionnage.....	»	»	3.344,25	
	Octroi.....	»	»	1.788,30	
	Main-d'œuvre de pose.....	»	»	37.279,90	
	Frais de retouche incombant à Combe et Delalieu.....	»	»	326,60	
	Riblons dans le chariot mobile.....	11.300	8	908,80	
	Frais divers.....	»	»	353,05	63.105,37
	Total général.....	349.218			354.280,67

§ 2. — Ascenseurs Roux, Combaluzier et Lepape.

a) Poids d'un ascenseur :

Fourniture de MM. Carion-Delmotte :	*kg*	
2 cylindres en tôle et plongeurs en fonte	24.275	
2 supports des cylindres	8.775	
2 chapes à la tête des plongeurs et poulies de mouflage	8.988	
2 sommiers du fond des cylindres	2.817	
2 glissières des plongeurs	5.476	
2 boîtes à pignon Galle	3.365	
2 roues motrices	7.936	
2 arbres moteurs	3.995	
24 dents des roues motrices et boulons	1.628	
2 poulies de renvoi supérieures	3.976	
Gaines enveloppant les roues motrices et les poulies de renvoi	26.270	
Tubulures d'arrivée d'eau aux cylindres	108	
Divers	2.088	
Poids total de la fourniture principale	99.697	
Mécanismes divers	576	100.273 *kg*
Fourni par divers :		
Gaines courantes	40.610	
Pistons et tendeurs	14.565	
Chaine Galle	11.237	
Boîtes à graisse et essieux	1.750	
Tuyaux divers	2.367	
Mécanisme de manœuvre et de distribution	3.000	
Mécanisme d'arrêt automoteur	1.618	
Une cabine double	6.400	
Rails de la voie	2.016	
Moitié de la canalisation générale	9.000	
Moitié des réservoirs en tôle, supports de tuyaux, etc.	4.304	
Boulons et pièces diverses	1.551	98.418
Poids total d'un appareil		198.691 *kg*

b) Prix de revient des deux ascenseurs :

NOM DU FOURNISSEUR.	DÉSIGNATION DE LA FOURNITURE.	POIDS	PRIX.	SOMMES PARTIELLES.	SOMMES TOTALES.
		Kg	*Fr.*	*Fr.*	*Fr.*
Carion-Delmotte (Anzin)	Cylindres, plongeurs, supports des cylindres, sommier du fond des cylindres, glissières, boîtes à pignon Galle, roues et arbres moteurs, partie des gaines, tubulures d'arrivée d'eau aux cylindres, divers	199.394	0,60	119.636,00	
Commentry-Fourchambault		1.152	»	4.600,32	124.236,32
	Gaines courantes	66.079	0,38	25.110,02	
	Gaines courbes	15.141	0,46	6.964,86	32.074,88
Fres Gueldry-Grimault.	Chaîne Galle	22.475	1,15	»	25.858,90
Darnay	Bielles courantes, tendeurs et tringles	20.641	0,98	20.328,67	
	36 bielles avec contrepoids, fer et acier	1.620	1,25	2.025,00	
	— plomb et fonte	5.113	0,50	2.556,50	
	Frais supplémentaires pour les dites	»	»	357,25	
	3 pistons tendeurs de rechange	247	2,00	494,00	
	8 bielles à contrepoids fer et acier	360	1,60	576,00	
	— plomb et fonte	1.149	0,50	574,50	
	Canalisation, supports des tuyaux, étriers	1.667	0,675	990,25	
	Un grand réservoir en tôle	6.941	0,57	3.956,15	
	Frais supplémentaires	»	»	276,69	32.135,01
Guyenet	Pattes d'attache de la partie inférieure des pistons	248	»	1.084,00	
	10 grandes boîtes à graisse		90,00	900,00	
	10 petites boîtes à graisse	3.500	60,00	600,00	
	10 essieux en acier		280,00	2.800,00	
	Tuyaux divers	4.734	1,05	4.970,55	
	Mécanisme de manœuvre et de distribution	6.000	»	18.481,35	
	Mécanisme d'arrêt automoteur	3.236	1,75	5.663,00	
	10 boudins pour roue en fer forgé	253	0,70	177,10	
	Divers	600	»	586,00	
	Temps passé par divers, et fournitures	»	»	5.921,65	41.183,65
Cie du matériel de chemin de fer	2 cabines doubles	12.800	»	»	17.947,35
Aciéries de France	Rails de la voie	4.032	0,15	»	604,80
Decauville	Voie Decauville	2.000	»	»	626,39
Gibault	Moitié de la canalisation (Voir détail à l'Otis)	18.000	»	»	18.403,50
Divers	Moitié des frais de pose et canalisation payés par le chantier	»	»	2.052,95	»
	Prime Combaluzier et Lepape	»	»	15.000,00	»
	Frais d'études Guyenet	»	»	39.288,95	»
	Essais des bielles à la Compagnie P.-L.-M.	»	»	852,30	»
	Frais de montage	»	»	30.842,15	»
	Transports	»	»	28,80	»
	Octroi	»	»	2.642,23	»
	Divers, voyages et déplacements	»	»	1.924,45	88.525,93
	Total général	397.382			381.590,73

§ 3. — Ascenseur Edoux.

a) Poids approximatif :

2 cylindres y compris têtes et supports		19.000 *kg*
2 pistons		16.500
6 poulies sur les poutres diagonales avec axes et paliers		5.370
1 cabine A	Caisse	6.300
	Palonnier	450
	Plancher d'équilibre	1.950
1 cabine B	Caisse	6.750
	Parachute	1.950
Câbles d'enroulement		7.106
Câbles de suspension		3.628
Chapes, attaches de câbles, pistons tendeurs		2.380
2 distributeurs		680
Colonnes guides des pistons		32.400
Colonnes guides des fuseaux		34.020
Conduites		36.128
Colliers de support des conduites		716
Conduites en cuivre du plancher intermédiaire		445
Poids approximatif de la fourniture Edoux		175.773 *kg*
2 Réservoirs cylindriques (fourniture Darnay)		5.048
Plancher du parachute (fourniture Société de la Tour)		2.450
Poids total		183.271 *kg*

b) Prix de revient :

NOM DU FOURNISSEUR.	DÉSIGNATION DE LA FOURNITURE.	POIDS.	PRIX.	SOMMES PARTIELLES.	SOMMES TOTALES.
		Kg.	*Fr.*	*Fr.*	*Fr.*
Edoux	Mécanisme complet de l'ascenseur (Voir le détail sur le métré).				
	Le tout à forfait	»	»	»	215.000,00
Darnay	Deux réservoirs à fond sphérique en tôle	5.048	0,45	2.271,60	
	Part des frais de montage des réservoirs	»	»	292,60	
	Pièces accessoires de l'avertisseur Parenthou, pour l'étage intermédiaire	»	»	334,52	2.898,81
Société de la Tour	Travaux de modification effectués par la Société	»	»	»	342,30
	Total	»	»	»	218.241,11

§ 4. — Machineries.

Prix de revient :

NOM DU FOURNISSEUR.	DÉSIGNATION DE LA FOURNITURE.	POIDS.	PRIX.	SOMMES PARTIELLES.	SOMMES TOTALES.
		Kg.	*Fr.*	*Fr.*	*Fr.*
de Quillacq et Meunier.	2 machines à vapeur élévatoires système Wheelock, avec pompes Girard à double effet et à piston plongeur, à 30.000 *fr.* l'une	»	30.000	60.000,00	
	Robinet détendeur de manomètre	»	»	522,00	
	Purgeur automatique	»	»	244,00	60.766,00
Guyenet	Essais des machines	»	»	»	400,00
Niclausse	4 chaudières multitubulaires de 80 m^2 de surface de chauffe et 3 m^2 de surface de grille, produisant 1.500 *kg* de vapeur à l'heure, y compris tous accessoires, deux petits chevaux alimentaires, tuyauterie de refoulement d'eau à chacun des générateurs, quatre ventilateurs « Bourdon », un collecteur général de refoulement d'air, bielles de commande des papillons, une porte en tôle fermant l'espace entre deux groupes de générateurs.				
	Forfait	»	»	50.000,00	
	Frais supplémentaires	»	»	90,75	50.090,75
Gouyer	Tuyauterie des générateurs aux machines	»	»	»	12.610,15
Gibault	Conduites en fonte de 0,200 servant à l'évacuation des eaux chaudes de condensation des machines et aboutissant, sur un développement de 230 *m*, à la conduite générale de l'Exposition dans l'avenue de Suffren	»	»	»	3.300,00
Darnay	1 réservoir pour l'évacuation des eaux de condensation de 2,50 × 0,80 × 1	531	0,45	238,95	
	Tuyaux de flotteur et accessoires en tôle galvanisée	»	»	245,48	
	Dépenses diverses pour le montage	»	»	861,00	1.345,43
Divers	1 moteur à gaz de 4 chevaux (Société des moteurs à gaz)	»	»	»	3.400,00
	1 avertisseur électrique Parenthou	»	»	»	2.800,00
	Fourniture d'une pompe système Thirion	»	»	»	450,00
	1 réservoir rectangulaire (Société de la Tour)	»	»	»	292,40
Bernard	Salle des machines :				
	Plancher et passerelle	29.066	0,45	13.052,70	
	Fers à T du plancher	6.352	0,21	1.333,92	
	Lanterneau	2.145	0,45	965,25	
	—	596	0,40	834,40	
	Plancher du réservoir en tôle striée	4.732	0,34	1.608,88	
	Fourniture principale	42.831		17.795,15	
	Plancher de passerelle	1.861	0,60	1.116,60	
	Soute à charbon	827	0,90	740,30	
	Plancher des chaudières	479	0,90	431,00	
	Caniveau des chaudières	241	0,90	216,90	
	Tôles striées	1.017	1,50	1.525,50	
	Un poste	205	0,90	184,50	
	Une échelle	63	1,50	94,50	
	Garde-corps	439	1,50	508,50	
	Deux volets	»	45,00	90,00	
	Huit boulons	2	1,50	3,00	22.705,95
Pillet-Schmid	Charpente en bois		»	4.586,10	
	Fer et quincaillerie	»	»	2.837,00	7.423,10
	Main-d'œuvre payée par le chantier	»	»	»	1.284,05
Toisoul et Fradet	Construction d'une cheminée et d'un conduit de fumée dans le Champ de Mars :				
	Transport de terre des fouilles	954 m^3	2,50	2.386,25	
	Cheminée et conduit de fumée	»	»	16.976,55	19.362,80
Gerbe	Travaux de maçonnerie :				
	Matériaux	»	»	1.226,05	
	Main-d'œuvre en régie	»	»	3.614,20	4.840,25
	Total général	»		»	191.070,88

§ 5. — Phare et service électrique.

En dehors des dépenses portées plus haut et qui ont été soldées par M. Eiffel, il faut relater celles se rapportant à l'appareil optique du phare, aux projecteurs et au service électrique qui incombaient à la Société nouvellement constituée de la Tour et qui ont été fournis par MM Sautter, Harlé et C^ie^.

Ces dépenses ont été les suivantes à la fin de l'exercice 1889.

1° Un appareil de phare complet de 0,60 *m* de diamètre, éclairant tout l'horizon, avec tambour dioptrique et partie inférieure catadioptrique, un tambour tournant de verre coloré, un régulateur de lumière électrique.

2° Un projecteur Mangin de 0,90 de diamètre, avec régulateur au courant de 100 ampères.

3° Un moteur à vapeur, type pilon à 2 cylindres compound, actionnant, par l'intermédiaire d'une courroie, une dynamo compound, de 300 ampères et de 80 volts, et alimentant le phare et le projecteur actuellement prévu, et, éventuellement, un deuxième projecteur.

4° Un tableau de distribution avec ampèremètres, voltmètres, commutateur et coupe-circuit.

5° 1.200 *m* de câble nu et 200 *m* de câble isolé, 130 isolateurs en porcelaine.

Le tout à forfait		30.000,00 *fr.*
Fourniture d'un deuxième projecteur Mangin de 0,90 *m* de diamètre	5.800,00 *fr.*	
Un régulateur de 100 ampères	1.000,00	
600 *m* de câble nu et 100 *m* de câble isolé	1.200,00	
Modification au tableau de distribution	150,00	
Total	8.150,00	
Réduction consentie	650,00	
Prix net à forfait		7.500,00
Fourniture d'un deuxième moteur à vapeur type pilon, commandant une dynamo Gramme, semblable à la précédente	14.107,50	
Plus-value pour le remplacement des 2 dynamos par 2 dynamos type S de 600 ampères et 70 volts	4.750,00	
Un tachymètre Buss	325,00	19.182,50
Montage et conduite des appareils		4.268,95
Fournitures diverses		4.597,30
Montant des dépenses payées par la Société de la Tour pour le phare et les projecteurs (factures Sautter)		65.548,75
Deux pompes à air avec leurs condenseurs à 2.700 *fr.*		5.400,00
Voie et wagonnets des projecteurs (facture Decauville)		891,90
Service électrique : (facture Sautter).		
Ligne principale du sol au 1^er^ étage	1.170,00	
» du 1^er^ au 2^e^ étage	855,00	
» du 2^e^ au 3^e^ étage	1.640,70	
85 lampes montées sur abat-jour à 30,85 *fr.*	2.622,25	
6 lampes montées sur bras en fer à 30,85 *fr.*	185,10	
84 lampes » à 33,65 *fr*	2.826,60	9.299,65
51 lampes montées sur appareillage fournies par la Société de la Tour, à 27,45 *fr*	1.399,95	
3 lampes sur chandelier à 32,60 *fr*	97,80	
26 lampes sur douilles	748,80	
44 lampes montées dans des lanternes, culasses en fonte, à 53,80 *fr.*	2.367,20	4.613,75
Soit en tout 299 lampes pour la somme de 13.913,40 *fr.*		
Total des dépenses du phare et service électrique.		85.754,05

Résumé des dépenses des organes mécaniques.

Ascenseurs Otis	354.280,67 *fr.*
» Roux, Combaluzier et Lepape	381.596,73
» Edoux	218.241,11
Machinerie générale	191.070,88
Phare et service électrique	85.754,05
Total général	1.230.943,44 *fr.*

Aux dépenses ci-dessus doivent s'ajouter les dépenses faites postérieurement par la Société de la Tour (en dehors de l'outillage et des matières d'entretien) pour tous accessoires des machines anciennes et nouvelles, pièces et câbles de rechange, appareils indicateurs, etc., ainsi que pour les modifications en service.

Dépenses de la Société de la Tour pour les appareils mécaniques	45.920,65 *fr.*	
Frais d'études de l'ingénieur, M. Guyenet	9.755,65	55.676,30 *fr.*
Dépenses supplémentaires à la charge de M. Eiffel		7.956,52
Total		63.632,82 *fr.*
Ce total, ajouté aux dépenses précédentes s'élevant à		1.230.943,44
donne, pour l'ensemble des appareils mécaniques, une dépense totale de		1.294.576,26 *fr.*
dont payé par M. Eiffel	1.153.145,91 *fr.*	
et » par la Société	141.430,35	
Total égal	1.294.576,26 *fr.*	

CINQUIÈME PARTIE.

Dépenses et Travaux complémentaires Exploitation

CHAPITRE I

§ 1. — Fers et fontes de la superstructure.

Nous avons vu (p. 17) que sur les 7.341.214 *kg* formant le poids total de la Tour, il devait être affecté à la superstructure métallique proprement dite un poids de 6.911.802 *kg*.

Ce poids comprend :

Les fournitures faites par les ateliers de Levallois-Perret.	6.360.067	*kg.*
Moins les poutres de support des ascenseurs Otis (sans rivets) déjà comptées aux ascenseurs.	54.723	
Reste.	6.305.344	*kg.*
Plus les livraisons directes au chantier, pour le compte des ateliers de Levallois-Perret, s'élevant, suivant détail qui sera donné plus loin, à.	373.194	
Ensemble.	6.678.538	*kg.*

Toutes ces fournitures ont été faites au prix de 40 *fr* les 100 *kg* rendus à pied-d'œuvre, l'octroi en plus; cet octroi s'élève à 3,60 *fr* pour les fers profilés et à 2,40 *fr* pour les fontes de construction.

Il a été dit précédemment (p. 101) que tous les fers provenaient des usines de MM. Dupont et Fould, maîtres de forges à Pompey (Meurthe-et-Moselle) représentés par M. A. Prégre, leur directeur à Paris, et nous avons indiqué la qualité de ces fers.

Ils ont été livrés aux prix suivants :

Cornières égales de 40 à 100.	13,25 *fr*	les 100 *kg*	rendus franco aux ateliers.
Fers marchands de 1re et 2me classes.	13,25	»	»
» 3me et 4me »	13,75	»	»
Larges plats jusqu'à 500.	15,00	»	»
Tôles ordinaires.	15,50	»	»
Tôles striées	16,50	»	»
Fers spéciaux simple T de l'album.	16,00	»	»
Cornières ouvertes et fermées aux angles demandés.	20,00	»	»

Les rivets ont été fournis par MM. Letroteur et Bouvard à Paris. La qualité était celle des rivets des chaudières de locomotives.

La résistance était de 36 *kg* par mm^2 et l'allongement minimum 12 p. 100 sur une éprouvette de 100 *mm*

de longueur. Ils devaient pouvoir être infléchis à un angle de 45° et être redressés à froid sans cassure ni criques.

Les prix étaient les suivants :

18,40 *fr* les 100 *kg* pour rivets de 18 à 25 *mm*.
23,00 » » 16 *mm*.
25,50 » » 14 »

Les autres fournitures qui s'appliquent aux escaliers, aux fers des galeries et aux passerelles, s'élèvent, suivant détail donné plus loin, à un poids de 233.264 *kg* et sont portées à leur prix respectif de facture.

L'ensemble de toutes ces fournitures comprend ainsi 6.911.802 *kg* pour une somme de 3.055.071,74 *fr*, suivant tableau ci-dessous.

DÉSIGNATION.	QUANTITÉS TOTALES.	QUANTITÉS PARTIELLES.	PRIX. *Par 100 Kg.*	SOMMES.
	Kg.	*Kg.*	*Fr.*	*Fr.*
1° *Fournitures faites par les ateliers de Levallois-Perret*		6.360.067		
A déduire : poutres de support des ascenseurs Otis, suivant bordereau (portées au compte des ascenseurs)		54.723		
Reste	6.305.344	6.305.344		
2° *Fournitures faites directement au chantier par divers pour le compte des ateliers de Levallois-Perret :*				
Rivets et boulons de montage		207.227		
Barres en U des galeries		6.353		
Balustrade du 1er étage (fonte)		5.718		
Colonnes du 1er étage (fonte)	373.194	51.721		
Volutes des arcs décoratifs		25.512		
Fer I de 140 pour plancher des galeries		74.144		
Sabots et clavettes des arcs décoratifs		2.519		
Total des fournitures des ateliers de Levallois-Perret		6.678.538	40	2.671.415,20
Octroi sur les fers et fontes				186.032,18
3° *Fournitures de divers :*				
Escalier du 1er au 2me (Pillet et Schmid)		53.760	56	30.105,60
— 2me au 3me —		30.214	65	19.639,10
— de service (Bernard)	108.678	8.621	48	4.138,08
— — —		3.708	60	2.224,80
— — (Pillet et Schmid)		12.375	65	8.043,75
Fers des galeries (Bernard)		82.785	65	53.810,25
Châssis en fer pour entre-colonnement	84.827	2.042	100	2.042,00
Passerelles Otis (Bernard) :				
Rez-de-chaussée		4.394	60	2.636,40
1er étage	22.973	10.503	60	6.301,80
2me étage		8.076	50	4.038,00
Passerelles Combaluzier (Bernard) :				
Rez-de-chaussée		10.063	60	6.037,80
1er étage	15.897	5.834	60	3.500,40
Abris couverts du 2me étage	880	880	60	711,20
Totaux	6.911.802	6.911.802		3.000.676,56
Nota. — Les fers de l'infrastructure dont il a été tenu compte antérieurement comprennent (avec répartition des rivets de montage) les poids suivants :				
Appuis et ancrages		165.628		
Soubassements	429.412	164.492		
Pile n° 3 (charpente comptée à la machinerie)		42.831		
Poutres de support des ascenseurs Otis. Poids total du métal entrant dans la Tour.		56.461		
(Non compris fondations, ascenseurs. — Poids : 1.223.602 *kg*. Voir p. 17).	7.341.214	7.341.214		

CHAPITRE II

PLATES-FORMES

§ 1. — Plate-forme du 1er étage.

Cette plate-forme est représentée en plan dans la planche XVIII, fig. 3, et en élévation dans la planche XIX, fig. 1. Elle est située à la cote de 91,13 *m*. Elle occupe une vaste surface carrée de 70,69 *m* de côté, mesuré dans l'axe des colonnes extérieures, et de 71,69 *m*, mesuré à l'extérieur du chéneau.

Dans le centre de la Tour, existe une partie vide formée par un carré de 29,00 *m* de côté à angles abattus, et présentant dans le milieu des côtés des renflements portant des balcons en porte-à-faux :

La surface totale mesurée extérieurement au chéneau est de 5.140 m^2, celle du vide intérieur de 724 m^2.

La surface nette est donc de 4.416 m^2.

La plate-forme est limitée à l'extérieur par une galerie de 2,60 *m* de largeur, régnant sur tout le pourtour, et à l'intérieur par quatre balcons, un sur chaque face, présentant une saillie arrondie.

La partie de la plate-forme occupée par les emplacements des quatre piliers est affectée aux ascenseurs et aux escaliers, et contient en outre quelques petits pavillons et boutiques servant à la vente des tickets et de menus objets.

Entre les piliers sont construits quatre bâtiments principaux, qui sont :

Le restaurant Flamand, transformé, depuis l'Exposition de 1889, en théâtre, et situé sur la face Nord-Ouest ; le restaurant Russe situé sur la face Nord-Est ; le restaurant Français sur la face Est-Sud, et enfin le bar Anglo-Américain transformé en brasserie, et situé sur la face Sud-Ouest.

Nous donnerons une description détaillée de chacune des parties de la plate-forme et les diverses transformations qui y ont été apportées depuis 1889.

a) *Plancher.* — Le plancher de la plate-forme, non compris celui de la galerie et des balcons, était à l'origine formé par un hourdis en terre cuite creuse (système Perrière) s'appuyant sur des solives en fer de 0,160 *m* de hauteur et espacées de 0,65 *m*. Ce hourdis était recouvert d'une chape en ciment recevant les lambourdes en bois de 11 × 8 (madrier scié en deux) scellées au plâtre, sur lesquelles reposait un platelage en planches jointives de 22 × 3,8 (madrier refendu en deux) recouvert d'une couche d'asphalte. Ce plancher pesait 145 *kg* par m^2 décomposés comme suit : Hourdis Perrière 70 *kg* ; Bois 27 *kg* ; Asphalte 48 *kg*.

Depuis 1889, la structure du plancher a été modifiée. Les lambourdes, les madriers et l'asphalte ont été supprimés. Sur chaque solive, on a élevé une petite murette en ciment, ayant la largeur de l'aile de la solive et une hauteur variant de 0,05 *m* à 0,10 *m*, afin de donner la pente nécessaire pour l'écoulement des eaux pluviales. Sur ces murettes est disposé un dallage en ciment armé de 30 *mm* d'épaisseur.

Ce dallage, exécuté par M. Coignet, est d'un bon service et le poids au mètre superficiel, y compris murette, n'est plus que de 110 *kg* au lieu de 145 *kg*.

b) *Galerie.* — La galerie de pourtour a son sol situé à la cote 89,93 *m*, soit à 1,20 *m* au-dessous de celui de la plate-forme proprement dite. Cette disposition a été adoptée pour que les promeneurs de la galerie ne gênent pas la vue des consommateurs des restaurants. Du reste, de nombreux escaliers facilitent le passage d'un niveau à l'autre.

Le sol des galeries n'est pas hourdé. Il est simplement constitué par un plancher bitumé. Le poids par mètre superficiel est de 75 *kg* comprenant 27 *kg* de bois et 48 *kg* d'asphalte.

Chaque galerie est formée d'une série de 9 arcades (Pl. XIX, fig. 1) ayant 7,76 *m* d'ouverture pour les arcades courantes, 7,96 pour les arcades d'angle, et une hauteur de 6,95 *m* à la clef.

Ces arcades en fer et bois, dont les armatures en fer sont représentées dans la planche XXIII, fig. 11,

ont la forme d'un croissant, dont la hauteur au sommet est de 2,00 *m*. Dans les parties comprises entre les rayons de ces croissants existent des cabochons en verre jaune et, en dessus de ceux-ci, des verres coulés étamés et teintés donnant l'aspect de plaques dorées. Le tout est couronné par un grand motif en zinc estampé. Les arcades sont raccordées l'une à l'autre par des écussons décoratifs servant de base à des mâts de 8,00 *m* de hauteur portant des drapeaux.

Chacune d'elles est divisée en deux autres demi-circulaires, dont les arêtes réunies par un treillis de bois reposent sur des colonnes en fonte ; la colonne du milieu est unique ; les deux extrêmes comprennent entre elles un panneau plein formé par un remplissage en porcelaine décorative fourni par M. Parvillée. Enfin, les colonnes sont réunies par un garde-corps constitué par des balustres en grès verni maintenus par une lisse en fer et par une large main courante en bois. Ces balustres, au nombre de 560, ont été fournis par la maison Émile Muller.

Tout cet ensemble est traité de la manière la plus décorative et a été généralement considéré comme d'un excellent aspect.

La couverture de la galerie est en zinc ondulé reposant sur un voligeage qui lui-même prend appui sur cinq petites fermes en fer comprises dans la profondeur de l'arcade. Au droit des restaurants, la toiture de chaque arceau se prolonge sur toute la profondeur du bâtiment et fait corps avec lui.

Au centre de chaque arcade est disposé un gros ballon en verre dépoli enveloppé d'un treillage métallique, dans lequel est un bec de gaz. Cette ligne de ballons lumineux éclaire la galerie et est d'un aspect très décoratif pendant la soirée et même dans le jour.

Tout l'éclairage extérieur des plates-formes était fait, pendant l'Exposition, au moyen du gaz, par des candélabres portant des pots à feu de 750 et 550 *l*.

L'éclairage intérieur était électrique. Après l'Exposition, le gaz a été supprimé et remplacé partout par des lampes à incandescence : c'est pour ce motif que les appareils générateurs d'électricité ont été doublés, ainsi que nous l'avons vu à propos des organes mécaniques.

Évacuation des eaux pluviales. — L'évacuation des eaux pluviales tombant sur les galeries, la plate-forme ou les balcons, a nécessité une canalisation assez compliquée, qui est représentée planche XVIII, fig. 3, à laquelle nous nous reporterons.

Les eaux qui tombent sur la toiture des galeries se réunissent d'abord dans les chéneaux qui séparent chaque arcade de la suivante et qui sont en pente vers l'extérieur. De là, ces eaux arrivent par les tuyaux I (voir notamment la pile 4 de cette planche) dans le chéneau qui entoure toute la galerie, pour venir s'écouler dans les tuyaux G ou C. Ces derniers servent de collecteurs pour les tuyaux T, qui partent eux-mêmes des siphons S répartis en des points bas sur la surface de la plate-forme et des balcons.

Les collecteurs C, au nombre de quatre, se réunissent deux par deux pour aboutir ainsi à deux conduites de descente *x*, fixées aux arbalétriers intérieurs *a* des piles 4 et 2. Ces conduites, qui servent aussi à l'évacuation des matières des water-closets, aboutissent à un égout souterrain passant auprès des pieds de la Tour

c) *Restaurants.* — Les locaux affectés aux restaurants comprennent quatre bâtiments ayant les mêmes dimensions en plan, mais présentant des élévations différentes suivant le style adopté : Flamand, Anglo-Américain, Russe et Français.

La longueur est déterminée par celle des 3 arcades centrales dont l'extrados se prolonge pour former la couverture circulaire des trois travées du bâtiment. Cette longueur est donc de $3 \times 7{,}765 = 23{,}295$ *m*. Les ouvertures de 7,765 *m* sont divisées elles-mêmes en deux entraxes de 3,88 *m* donnant la largeur des baies vitrées ouvertes sur la galerie.

La largeur comprend les trois mêmes entraxes donnant 11,65 *m*, plus une annexe de 3,35 *m*, soit ensemble 15,00 *m*.

Cette annexe ne monte à toute hauteur que dans la travée centrale. Sur les côtés, cette partie s'arrête à une hauteur de 2,95 *m* et forme deux terrasses garnies de plomb auxquelles on accède de l'intérieur par un escalier spécial.

La construction est faite en bois apparent pour les restaurants Anglo-Américain, Flamand et Russe. Elle est en pans de bois garnis de staff pour le restaurant Français. Tous ces bois ont été passés, au moment de leur pose, à un enduit ignifuge dans la crainte d'un incendie dont les conséquences eussent pu être redoutables.

Nous donnons ci-dessous la description sommaire de ces restaurants, avec les modifications qui y ont été apportées ; nous y joignons celle des kiosques et water-closets y compris le service des eaux :

Bar Anglo-Américain (Pl. XXX, fig. 1 à 10). — Le nombre des rangées de fermes triples est de deux. Elles reposent, dans la partie intermédiaire, sur des poteaux doubles en bois; elles ont la forme et les dimensions indiquées à la figure 6.

La façade antérieure donnant sur la galerie est située à 1,685 *m* en arrière de l'extrémité de la plate-forme, de manière à ménager une terrasse placée à 1,20 *m* au-dessus du sol de la galerie. Cette terrasse est protégée par une balustrade (Pl. XXIX, fig. 15, 16 et 17).

Les bois de la façade antérieure s'attachent aux fermettes en fer de la galerie par des caissons représentés dans les figures 9 et 10 de la planche XXX.

Toute cette partie antérieure est occupée par des baies.

Dans la partie postérieure, les parois sont ainsi constituées: les poteaux d'angle et principaux ont 16 × 16; ceux des panneaux intermédiaires ont 10 × 10 et sont réunis par deux cloisons en frises de 0,11 *m* de largeur et de 25 *mm* d'épaisseur.

Les pignons sont décorés par des vitraux colorés de la maison Champigneulle.

Sous les terrasses sont installés les services annexes des restaurants (offices, lingerie, W.-C., descentes aux caves et cuisines, etc.).

La couverture de forme circulaire est en zinc ondulé ; les 3 travées sont séparées par un chéneau de 0,65 × 0,32. L'eau est dirigée, comme on l'a vu, dans le chéneau de la galerie du 1er étage.

A la partie supérieure de la couverture est un lanterneau de 2,65 *m* de largeur. Pour ce restaurant, il est couvert en zinc et ne sert qu'à l'aération. Il en est de même pour les restaurants Flamand et Français. Pour le restaurant Russe, il comprend trois châssis vitrés.

Le plafond horizontal est divisé en caissons, ménageant quatre panneaux vitrés dans la travée centrale et trois panneaux dans les travées latérales.

Le plancher posé sur le hourdis Perrière est constitué par des lambourdes en chêne scellées au plâtre et recouvertes par un parquet en chêne formé par des frises de 0,060 × 0,025.

Chaque restaurant comprend deux sous-sols, dont l'un est destiné à la cuisine, l'autre à la cave. La largeur est de 3,80 *m*, la hauteur de 3,60 *m* et la longueur de 11,93 (Pl. XVI, fig. 8 et 9).

Le plancher de ces sous-sols est, comme celui du restaurant, constitué par un hourdis Perrière recouvert de bois et de bitume; les cloisons sont en carreaux de plâtre revêtus extérieurement de bois.

Les sous-sols communiquent entre eux par des passerelles, placées aux piles 2 et 3.

Les ordures des restaurants sont portées chaque matin à une trappe U située près du pilier Est (Pl. XVIII, fig. 3) et fermant un gros tuyau S de 0,50 *m* de diamètre qui longe l'arbalétrier intérieur de la pile Est. Ce tuyau aboutit vers le sol à un wagonnet *u* (fig. 1) qui est enlevé une fois plein et livré au service de la voirie.

Restaurant Russe. — Il est semblable au précédent, sauf la décoration. Les façades en sont représentées dans la planche XXIX, fig. 9, 11 et 12. Les fermes sont représentées dans les coupes nos 13 et 14, et le plan est indiqué figure 10.

Le plafond plein des autres bâtiments est remplacé par des velums.

Dans la façade donnant sur la galerie, la paroi antérieure vitrée a été remplacée depuis l'Exposition par un bow-window, occupant la largeur de la terrasse, et faisant saillie de 1,97 *m* sur la façade. La nouvelle paroi, très riche et très élégante, est formée par de grands châssis de glaces mobiles d'une dimension exceptionnelle, 3,53 × 1,90. Ces châssis mobiles sont très exactement équilibrés par des contrepoids en plomb et peuvent, presque sans effort, être élevés ou abaissés au gré des dineurs, suivant que le temps est beau ou mauvais.

Restaurant Français. — Il est représenté comme façades dans la planche XXIX, fig. 1, 2, 3, 6, comme coupes fig. 7 et 8, et comme plan et couverture fig. 4 et 5.

Il est construit en pans de bois formés par des poteaux de 18 × 18 et des écharpes de 8 × 8, réunis extérieurement par un voligeage brut sur lequel on a marouflé une toile enduite de peinture ; l'aspect décoratif est obtenu par un treillage cloué sur cette toile. A l'intérieur sont disposés des panneaux de staff sculpté formant la décoration; le tout est recouvert par un enduit à la céruse et plusieurs couches de peinture blanche. Le plafond et les cloisons sont également en staff. Le plafond ne contient qu'un seul panneau vitré ovale par travée.

La disposition en plan comprend une grande salle occupant la travée centrale ; d'un côté un grand salon de 11,55 *m*, de l'autre un vestibule d'accès à deux petits salons réservés. Du côté intérieur et sur les travées latérales se trouvent les services annexes. Cette partie a été recouverte, depuis l'Exposition, par des cabinets particuliers, occupant l'emplacement des terrasses des autres restaurants.

Restaurant Flamand. — Ce restaurant était identique au bar Anglo-Américain, sauf la décoration. Depuis l'Exposition, il a été transformé en salle des fêtes et en théâtre. Il est représenté en façade planche XXX, fig. 11, 12 et 17, en coupe fig. 13, 14, 15, 18, 19 et 20, et en plan fig. 16 et 21.

En avant de l'orchestre, sont disposés 8 rangs de fauteuils et latéralement 7 rangs de chaises sur chaque côté. Le fond de la salle est occupé par 10 baignoires. Le nombre total des places est de 280.

La scène est située du côté de l'intérieur. Elle a pour largeur celle de la travée centrale, soit 7,705 *m*, et pour profondeur 4,40 *m* jusqu'à la toile du fond. Afin de ménager un passage derrière celle-ci, on a arrondi la paroi extérieure parallèlement au balcon de la plate-forme. La scène est surélevée de 0,85 *m* au-dessus du plancher du théâtre. A droite et à gauche sont disposés le cabinet de la Direction, correspondant à un couloir qui aboutit au tambour de la porte d'entrée, et des loges d'artistes.

Pendant les entr'actes, les spectateurs peuvent se rendre par de larges baies sur la terrasse donnant sur la face Nord-Ouest, et sur la partie de la galerie longeant le théâtre.

L'entrée du public se fait par la façade Ouest, qui est munie d'un tambour. A gauche se trouve la caisse, à droite est un couloir qui mène au cabinet du directeur.

La couverture est identique à celle du bar Anglo-Américain.

Le sous-sol est réservé aux loges d'artistes.

Le restaurant Flamand et le bar Anglo-Américain ont été construits par la maison Pombla, comme charpente et menuiserie.

Les restaurants Russe et Français ont été construits, comme charpente, par MM. Pillet et Schmid, et, comme menuiserie, par M. Deleuze.

Kiosques, water-closets, eau d'alimentation, service d'incendie. — Dix-huit kiosques ou boutiques répartis vers les piliers servent à la vente des tickets pour les ascensions aux 2me et 3me étages, ou à la vente des menus objets, tels que souvenirs, photographies, etc. Leur emplacement est indiqué sur la planche XVIII, fig. 3.

Les water-closets et urinoirs publics, au nombre de deux, sont situés l'un sur la face Ouest de la Brasserie, et l'autre sur la face Est du restaurant Russe.

Ils comprennent chacun un urinoir et un water-closet à deux cabines.

En outre, pour chacun des restaurants il existe, soit pour les consommateurs, soit pour le personnel, des water-closets avec lavabos, et des urinoirs spéciaux, placés les uns au niveau de la plate-forme, les autres dans les sous-sols.

Les eaux et les matières de ces water-closets sont toutes amenées, par des canalisations, dans les conduites *x* (Pl. XVIII, fig. 3) qui longent l'arbalétrier intérieur des piles Est et Ouest. Ces mêmes conduites reçoivent les eaux des offices et des cuisines, ainsi que, comme nous l'avons vu précédemment, les eaux pluviales.

L'alimentation en eau ordinaire, pour les water-closets, les offices et les cuisines, est assurée par quatre réservoirs placés aux quatre piliers à 9 *m* de hauteur au-dessus du plancher du 1er étage, et cubant 2 m^3 pour ceux des piliers Est et Ouest, et 1 m^3 pour les deux autres. Ils reçoivent l'eau par un tuyau en plomb branché sur la conduite de l'ascenseur correspondant. Des robinets plongeurs automatiques ferment l'arrivée de l'eau, lorsque les réservoirs sont pleins.

L'alimentation en eau potable des restaurants est assurée par deux réservoirs communicants de 1 m^3 environ, placés l'un dans le pilier Sud, l'autre dans le pilier Nord. L'un d'eux, celui du pilier Sud, est alimenté par une petite pompe Worthington placée dans le sous-sol de la pile 3, qui refoule l'eau dans un tuyau placé sous la conduite *r'* de retour d'eau de l'ascenseur Edoux.

Le service d'incendie de la plate-forme est assuré par quatre prises d'eau aux quatre piliers, sur les conduites d'eau en pression des ascenseurs. Sur ces robinets on peut visser quatre manches à lance et produire un jet d'une très grande hauteur.

§ 2 — Plate-forme du 2me étage.

La plate-forme du 2me étage est située à la cote 149,23 (Pl. XIX, fig. 2 et 7). Elle forme un carré dont le côté mesuré à l'extérieur du chéneau est de 37,90 *m* et dont le pourtour est occupé par une galerie de 36,80 *m* sur 2,10 *m* de largeur, plus par deux chéneaux de 0,55 *m*. La surface, en tenant compte des angles abattus, est de 1.433 m^2.

Nous avons déjà décrit sommairement cette galerie, qui est représentée dans la planche XIIIbis, fig. 93 et 94

Les planchers de la plate-forme proprement dite et de la galerie sont constitués comme ceux du 1er étage. En 1895, on a, comme pour ceux-ci, remplacé le hourdis Perrière par du ciment armé.

La surface du plancher est : pour la galerie de 326 *m²*, pour la plate-forme proprement dite, 722 *m²*, enfin pour les abris, bars, chéneau, etc., de 385 *m²*, soit ensemble 1.433 *m²*.

Pour l'évacuation des eaux pluviales, le chéneau, qui entoure toute la ceinture du 2me étage, reçoit les eaux de la plate-forme et de la galerie. De là elles se rendent dans les deux tuyaux des arbalétriers intérieurs des piles Est et Ouest, et vont rejoindre ainsi celles du 1er étage.

Aménagement. — Cette plate-forme était très encombrée pendant l'Exposition et il n'y avait à proprement parler que la galerie extérieure qui servait aux visiteurs, pour examiner l'intéressant panorama qui se découvre déjà à cette hauteur. Le reste était presque uniquement consacré à la circulation entre les ascenseurs Otis et l'ascenseur Edoux.

C'est en raison même de cet encombrement que l'on se dispose, pour la nouvelle Exposition, à porter la largeur de la galerie extérieure à 4,00 *m* et à créer un nouvel étage surélevé par rapport au premier.

Pendant l'Exposition de 1889, la plate-forme était occupée (Pl. XIX, fig. 2 et 7) par :

1° Les charpentes supérieures des ascenseurs Otis entourées de leurs escaliers d'accès et des emplacements réservés pour les voyageurs en attente et qui y formaient de longues queues;

2° Les grands réservoirs cylindriques alimentant ces ascenseurs;

3° Les charpentes métalliques inutilisées pour le chemin des ascenseurs des piles 2 et 4, auxquelles on avait relié deux plates-formes polygonales dont la partie inférieure close servait d'abri en cas de très mauvais temps et dont la partie supérieure était utilisée, l'une comme atelier de photographie pour M. Neurdein, l'autre comme plate–forme d'observation;

4° Les accès de l'ascenseur Edoux, occupant la partie centrale et l'espace ménagé pour les queues à l'entrée;

5° Les quatre escaliers en hélice reliant la première plate-forme à la deuxième;

6° Enfin le départ de l'escalier en hélice qui relie cette 2me plate-forme aux étages supérieurs.

Le peu de place qui restait disponible était occupé par :

1° Un pavillon en bois servant d'imprimerie au *Figaro* et transformé depuis en buffet;

2° Un bar affecté à la boulangerie Viennoise et tenu par M. Jacquet.

Ces deux pavillons avaient été installés par les concessionnaires et à leurs frais.

3° Un bâtiment compris entre l'un des réservoirs et l'ascenseur Edoux, dans lequel étaient installés les bureaux de tickets et les water-closets.

Il existait en outre quelques boutiques et bars, et enfin des tentes-abris pour les consommateurs.

Un réservoir d'eau douce de 6 *m³*, alimenté par la petite pompe Worthington, dont il a déjà été question, était affecté au service du restaurant, des bars et des water-closets.

L'éclairage se faisait primitivement au gaz par des pots à feu de 750 *l* et des becs dans des globes. Depuis, on a employé exclusivement l'électricité.

§ 3. — Plate-forme du 3me étage, pavillon réservé et galerie supérieure.

(Voir Pl. XIV, fig. 2, pour la coupe, Pl. XVI, fig. 18, pour le plan, et Pl. XIX, fig. 3 et 9, pour l'ensemble.)

La 3me plate-forme a son plancher à la cote + 309,63; elle forme une chambre close, dont la partie centrale est occupée par l'ascenseur Edoux, et par les quatre piliers qui se prolongent jusqu'à la partie inférieure des grandes poutres diagonales du sommet. Le carré occupé par ces quatre piliers a 10 *m* de côté. Sur le pourtour règne une galerie-promenade en encorbellement à angles abattus, de 3,25 *m* de largeur, supportée par les grandes consoles du couronnement. La largeur est de 16,50 *m* et la surface de 251 *m²*.

Le sol est formé par des madriers jointifs de 0,08 *m*, placés sur les solives en fer et recouverts d'asphalte. La galerie-promenade a été surélevée de 0,18 *m* au moyen de lambourdes et d'un parquet de 25 *mm*, recouvert de linoléum.

Le pourtour est occupé par une paroi en bois et fer, formant un garde-corps de 1,20 *m* de hauteur,

surmonté par des ouvertures qui reçoivent des glaces mobiles que l'on peut élever ou abaisser suivant que l'on veut être ou non préservé du vent qui règne habituellement à cette hauteur.

C'est par ces ouvertures que les visiteurs peuvent contempler le panorama qui s'offre devant eux et dont les dessins en perspective placés au-dessus des ouvertures représentent les points les plus remarquables.

L'aménagement est complété par de petites boutiques disposées entre les piliers et la cage de l'ascenseur, dans lesquelles se vendent des souvenirs de la Tour.

Le plafond est formé par le dessous du plancher du pavillon réservé et de la galerie supérieure, auxquels on accède par un petit escalier tournant. La hauteur de la salle sous plafond est de 2,50 *m*.

La partie supérieure comprend un pavillon carré en bois, de 10,50 *m* de côté, entouré par une galerie à pans abattus de 2,77 *m* de largeur. Cette galerie à ciel ouvert, placée à la cote + 312,21, est munie d'un garde-corps à jour et d'un plancher à claire-voie ; elle reçoit la voie Decauville, servant au déplacement des deux projecteurs Mangin, et est garnie de bancs, d'où l'on peut jouir de toute la beauté de l'immense horizon.

Le pavillon comprend, outre l'emplacement de la cage d'ascenseur prolongée, un salon de réception avec cabinet de toilette, cuisine et water-closet, ainsi que quatre petits laboratoires destinés aux expériences scientifiques d'électricité, de météorologie, de physique et de physiologie (voir Pl. XIX, fig. 6). La hauteur est de 2,27 *m*; la toiture, presque horizontale, est garnie de plomb. Les parois sont doubles et munies à l'intérieur de coton minéral pour que les appartements soient à l'abri des intempéries.

De la galerie part l'escalier qui conduit au campanile et au phare.

Toute cette partie n'était pas accessible au public pendant l'Exposition; depuis, M. Eiffel en a, à certains jours, donné le libre accès au public, et un escalier spécial a été récemment aménagé à cet effet.

Le long du chéneau qui règne autour de la galerie sont disposés des paratonnerres inclinés; un cordon de bec de gaz dans des globes dépolis éclairait la partie supérieure de la Tour.

L'alimentation d'eau se faisait par un petit réservoir auquel aboutissait la conduite de la pompe Worthington à eau de source.

Les logements intérieurs étaient éclairés par l'électricité, et un téléphone reliait l'appartement au poste central téléphonique de la Tour qui communiquait lui-même avec le réseau public.

§ 4. — Prix de revient des plates-formes.

Le prix des aménagements de ces plates-formes telles que nous venons de les décrire est détaillé dans les tableaux qui suivent; les dépenses se résument comme suit :

DÉSIGNATION.	PRIX.	SUPERFICIE.	PRIX PAR MÈTRE.
	Fr.	*m²*	*Fr.*
Première plate-forme	473.807,86	4.416	107,00
Deuxième »	55.512,36	1.433	39,00
Troisième »	17.440,10	251	69,50
Pavillon réservé	22.481,82	144	156,00
Total	569.251,23		

Les principaux prix au mètre superficiel, c'est-à-dire ceux des planchers et ceux des bâtiments, ont été les suivants :

Plancher des plates-formes :

Hourdis Perrière			6,00 *fr.*
Plancher en bois	Lambourdes	0,77	4,50
	Platelage	2,27	
	Main-d'œuvre	1,46	
Asphalte (prix moyen)			4,50
Total des planchers			15,00 *fr.*

Restaurants :

DÉSIGNATION.	PRIX.	SUPERFICIE.	PRIX PAR m².
	Fr.	m².	*Fr.*
Restaurant Français	61.437,01	350	184
» Russe	59.530,24	350	170
Bar Anglo-Américain	50.352,10	350	144
Restaurant Flamand	48.952,10	350	140
Totaux	223.271,48	1.400	159

A la somme de 569.251,23 *fr* qui représente les prix des trois plates-formes, il convient d'ajouter une somme de 38.577,38 *fr* pour le rez-de-chaussée.

La dépense complète pour les plates-formes et accessoires s'élève donc à la somme de 607.828,61 *fr*.

Mais en dehors de ces dépenses, la Société de la Tour a jugé nécessaire, pour lui faciliter son exploitation, de faire des constructions en dehors de celles prévues, et des installations spéciales de gaz, électricité, etc.

Ces dépenses ont été très importantes et se sont élevées à la somme de 265.665,99 *fr*, dont le détail est donné plus loin.

Détail du prix de revient des plates-formes.

DÉSIGNATION.	QUANTITÉS.	PRIX.	SOMMES PARTIELLES.	SOMMES TOTALES.
		Fr.	*Fr.*	*Fr.*
PREMIÈRE PLATE-FORME.				
Sol.				
Hourdis de planchers (Perrière)	2.467,94 m².	6 le m².	14.807,63	
Main-d'œuvre pour planchers			821,20	
Bois pour planchers, main-d'œuvre, goudrons, matières diverses			11.409,60	
Asphalte	2.780,01 m².	4,25 le m².	11.815,03	
Solives	105,39 m.	0,65 le m.	68,50	
Main-d'œuvre			286,64	
Châssis en fer pour verres dalles, au-dessus des caves (Pillet-Schmid)	16	170 la pièce.	2.720,00	
Pose de verres dalles			153,12	42.081,72
Corniche.				
Zincs d'ornement comprenant : 72 consoles avec clous carrés, ainsi que les moulures supérieures et inférieures sur le pourtour (Michelet)	72 intervalles.	190 »	13.680,00	
Supplément à la fourniture ci-dessus			1.259,10	
Main-d'œuvre du chantier pour pose des zincs ci-dessus			2.304,11	
Peinture décorative (Rivierre)			20.700,00	37.943,21
Garde-corps extérieur.				
Balustres en grès verni (E. Muller)	727	8,50 la pièce.	6.179,50	
Transport et octroi pour ces balustres			704,50	
Pose des balustres	720	1 »	720,00	
Main-courante en bois	237,60 m.	4,25 le m.	1.009,80	8.613,80
Balustrade intérieure.				
Cours de balustrade en fer forgé (Bernard)	107,25 m.	40 »	4.290,00	
Mains-courantes droites en bois (Bosc)	211,35 m.	4,25 »	855,70	
» circulaires »	72,60 m.	8,25 »	598,95	5.774,65
Galerie.				
Panneaux décoratifs en porcelaine pour entre-colonnements (Parvillée)	40	75 la pièce.	3.000,00	
Panneaux supplémentaires	40	10 »	400,00	
Peinture des lambrissages			1.387,26	
Arcades courantes (André)	14	1.560 la pièce.	21.840,00	
» avec caisson d'angle	4	1.610 »	6.440,00	
Arcades courantes (Bosc)	18	1.550 »	27.900,00	
Plus-value pour arcades d'angle	4	50 »	200,00	
A reporter			61.167,26	94.413,38

Détail du prix de revient des plates-formes (*Suite*).

DÉSIGNATION.	QUANTITÉS.	PRIX.	SOMMES PARTIELLES.	SOMMES TOTALES.
		Fr.	*Fr.*	*Fr.*
Report.....			61.167,26	94.413,38
Panneaux quadrillés.....	36	53 la pièce.	1.908,00	
Moulures.....	1260 *m.*	2,10 le *m.*	2.646,00	
Divers.....			995,05	
Modification aux arcades.....			200,00	
Verrerie des arcades (Neret).....	36 arcades.	170 la pièce.	6.120,00	
Paillons et divers pour arcades.....			1.141,25	
Moulures en zinc (Michelet).....	181 *m.*	8 le *m.*	1.448,00	
Écussons masques en zinc des abouts des chéneaux des arcades (Michelet).....	16	50 la pièce.	800,00	
Moulures cintrées en zinc (Michelet).....	50	8 »	400,00	
Consoles en bois (Bosc).....	40	70 »	2.800,00	
Cartouches en staff (Ragon).....	40	65 »	2.600,00	
»	36	75 »	2.700,00	
Petits cartouches sous les motifs, palmettes.....	36	20 »	720,00	
Scellement des petits cartouches et des cintres.....			792,00	
Frais divers pour modifications, montage et échantillons.....			993,85	
Mâts des arcades.....	34	8 »	272,00	
»	8	20 »	160,00	
Modification à ces mâts.....			378,00	
Colliers des mâts.....	40	6 »	240,00	
Pommes des mâts.....	50	1,75 »	87,50	
Peinture des mâts.....			320,00	
Couverture des galeries, chéneau et canalisation de plomberie (Sansot).....			34.275,58	
Charpente et menuiseries diverses.....			5.999,74	129.167,23
Restaurant Français.				
Charpente (Pillet et Schmid).....			12.400,00	
Caves et cuisine.....			3.212,50	
Trappes.....			140,00	
Treillage (Pillet et Schmid).....			5.000,00	
Toile sur volige (Pillet et Schmid).....			1.200,00	
Menuiserie (Deleuze).....			7.950,00	
Serrurerie (Deleuze).....			2.700,00	
Escaliers des caves (Bernard).....			1.510,80	
Châssis grillagés sur plafond (Bernard).....			1.541,95	
Staffs (Vast).....			12.000,00	
Parquet en chêne de 27 *mm* (Gourguechon).....	382 m^2.	6,35 le m^2.	2.422,51	
Couverture (Sansot).....			1.675,00	
Plomberie (Sansot).....			1.580,50	
Maçonnerie (Baconnet).....			1.434,25	
Balustrades (Pombla).....			999,75	
Peinture ignifuge (Haret).....			4.894,10	
Vitrerie (Rivierre).....			1.500,00	
Balustres et perrons (Pombla).....			2.275,68	64.437,04
Restaurant Russe.				
Charpente et menuiserie (Pillet et Schmid).....			31.500,00	
Caves et cuisines.....			3.212,50	
Trappes.....			140,00	
Parquet en chêne de 27 *mm* (Gourguechon).....	382 m^2.	6,35 le m^2.	2.422,51	
Châssis grillagés sur plafond (Bernard).....			1.895,70	
Peinture et vitrerie (Rivierre).....			8.500,00	
Peinture ignifuge (Haret).....			4.894,10	
Couverture (Sansot).....			1.675,00	
Plomberie (Sansot).....			1.580,50	
Maçonnerie (Baconnet).....			1.434,25	
Balustres et perrons (Pombla).....			2.275,68	59.530,24
Bar Anglo-Américain.				
Charpente et menuiserie (Pombla).....			25.000,00	
Impression des bois (Pombla).....			700,00	
Peinture et vitrerie (Rivierre).....			4.200,00	
Peinture ignifuge (Haret).....			4.894,10	
Châssis grillagés sur plafond (Bernard).....			2.817,55	
Caves et cuisines.....			3.212,50	
Trappes.....			140,00	
Couverture (Sansot).....			1.675,00	
Plomberie (Sansot).....			1.580,50	
Maçonnerie (Baconnet).....			1.434,25	
Parquet en chêne de 27 *mm* (Gourguechon).....	382 m^2.	6,35 le m^2.	2.422,51	
Balustrades et perrons (Pombla).....			2.275,69	50.352,10
A reporter.....				397.899,99

Détail du prix de revient des plates-formes (*Suite*).

DÉSIGNATION.	QUANTITÉS.	PRIX.	SOMMES PARTIELLES.	SOMMES TOTALES.
		Fr.	*Fr.*	*Fr.*
Report.....				397.899,09
Restaurant Flamand.				
Charpente et menuiserie (Pombla).....			25.000,00	
Auvents (Pombla).....			200,00	
Peinture et vitrerie (Rivierre.....			3.300,00	
Peinture ignifuge (Haret).....			4.894,10	
Châssis grillagés sur plafond (Bernard).....			2.817,55	
Caves et cuisines.....			3.212,50	
Trappes.....			140,00	
Couverture (Sansot).....			1.675,00	
Plomberie (Sansot).....			1.580,50	
Maçonnerie (Baconnet).....			1.434,25	
Parquet en chêne de 27 *mm* (Gourguechon).....	382 m^2.	6,35 le m^2.	2.422,51	
Balustres et perrons (Pombla).....			2.275,69	48.952,10
Tuyau d'évacuation des ordures pour les 4 restaurants.....				2.271,30
Kiosques, Urinoirs, W.-C. et divers.				
Kiosques (Mallet).....	10	500 la pièce.	5.000,00	
Travaux supplémentaires pour les kiosques.....			750,00	
Peinture décorative des kiosques (Rivierre).....			4.838,83	
W.-C. et urinoirs (Deleuze).....			1.400,10	
Toile pour les escaliers du sol au 1er étage (Cauvin-Yvose).....			2.416,00	
Travaux divers.....			10.279,54	24.684,47
Total pour la 1re plate-forme.....				473.807,86
DEUXIÈME PLATE-FORME				
Sol.				
Hourdis de plancher (Perrière).....	708,22 m^2.	6 le m^2.	4.249,30	
Bois pour plancher, main-d'œuvre, goudrons, matières diverses.....			5.700,00	
Asphalte.....	1.186,74 m^2	4,75 le m^2.	5.636,95	
Main-d'œuvre du chantier.....			286,61	15.872,89
Corniche.				
Consoles en zinc (Michelet).....	44	120 la pièce.	5.280,00	
Accessoires des consoles.....			36,35	5.316,35
Garde-corps.				
Panneaux décoratifs (Pillet et Schmid).....	134,92 *m.*	12 le *m.*	1.619,01	
Verre coulé étamé (Néret).....	75,76 *m.*	15 le *m.*	986,40	
Paillons en verre coulé étamé (Néret).....	408	3 la pièce.	1.224,00	
Pose desdits paillons (Néret).....			108,00	
Pose de baguettes (Néret).....			403,60	
Divers.....			70,00	4.411,04
Galerie.				
Couverture en zinc ondulé à 5,50 *fr* le m^2, et plomberie supplémentaire (Sansot).			4.129,58	
Travaux divers de charpente et menuiserie pour galerie.....			2.999,87	7.129,45
Kiosques-abris et divers.				
Charpente en fer (Bernard).....			2.143,40	
Travaux complémentaires (Broc).....			8.467,99	
Peinture décorative (Rivierre).....			4.838,83	
Parquets en chêne.....			289,25	
Main-d'œuvre et divers.....			5.002,00	
Modification aux escaliers d'accès aux ascenseurs (Société de la Tour).....			2.040,95	22.782,63
Total pour la 2me plate-forme.....				55.512,36
TROISIÈME PLATE-FORME.				
Sol.				
Bois pour planchers, main-d'œuvre, goudrons, matières diverses.....			950,00	
Asphalte.....	397,26 m^2.	5,25 le m^2.	2.085,60	
Main-d'œuvre du chantier.....			286,64	3.322,24
A reporter.....				3.322,24

Détail du prix de revient des plates-formes (*Suite*).

DÉSIGNATION.	QUANTITÉS.	PRIX.	SOMMES PARTIELLES.	SOMMES TOTALES.
		Fr.	*Fr.*	*Fr.*
Report.....				3.322,24
Galerie fermée.				
Croisées anglaises (Lepage).....	24	250 la pièce.	6.000,00	
Menuiserie en pitchpin (Waaser).....			1.282,47	
Couverture et planchers (Sansot).....			2.890,72	
Travaux divers de charpente et de menuiserie.....			999,06	11.173,15
Partie supérieure.				
Glaces de la lanterne du phare (Sautter).....	20	40 la pièce.	800,00	
Pose de ces glaces.....			119,50	
Paratonnerre (Société de la Tour).....			164,71	
Main-d'œuvre du chantier.....			1.261,54	
Peinture (Rivierre).....			206,35	
Arêtiers en zinc et boule.....			112,00	
Serrurerie (Bernard).....			289,70	2.953,80
Total pour la 3me plate-forme.....				17.449,19
PAVILLON RÉSERVÉ.				
Charpente (Bosc) à forfait.....			9.000,00	
Menuiserie (Waaser).....			3.686,75	
Serrurerie (Bernard).....			2.793,00	
Tenture (Le Mardelé et Cie).....			927,07	
Linoléum (Cie de linoléum).....			369,10	
Éclairage et lustre (Mayer).....			318,50	
Mobilier (Donon, Millot, Collin).....			4.995,30	
Travaux divers.....			391,50	22.481,82
Total pour le pavillon réservé.....				22.481,82
Total pour les plates-formes.....				569.251,23

Détail du prix de revient du rez-de-chaussée et divers.

REZ-DE-CHAUSSÉE.				
Sol.				
Bois pour plancher, main-d'œuvre, goudrons, matières diverses.....			950,00	
Asphaltes.....			529,45	
Solives.....	808,32 *m.*	0,65 le *m.*	525,40	
Main-d'œuvre.....			286,64	
Hourdis en briques tubulaires (Brault).....	500,74 *m²*.	6 le *m.*	3.004,44	
Main-d'œuvre.....			723,26	6.019,19
Maçonnerie.				
Maçonnerie des portes des bureaux servant à la distribution des tickets.....			244,60	244,60
Serrurerie.				
Châssis grillagés de la pile n° 3.....	94,61 *m²*.	10 le *m²*.	946,10	
Accessoires de la pile n° 3.....			376,50	
Grilles en fer forgé.....	8	250 la pièce.	2.000,00	
Accessoires pour grilles.....			124,00	
Escaliers de secours pour ascenseur Combaluzier et le manomètre (Pillet-Schmid).	10.945 *kg.*	48 les 100 *kg.*	5.263,60	
Grillage de l'escalier du sol au 1er étage (Jubelin).....			2.200,00	
Divers (mémoires Bernard).....			5.636,75	16.536,95
Décoration.				
Zinc pour les pieds des arcs.....			1.120,00	1.120,00
Aménagement.				
Kiosques doubles à l'entrée des soubassements des piles.....	2		2.500,00	
» » »	2		3.800,00	6.300,00
Gaz.				
Raccordement des conduites près des pieds.....			2.295,91	2.295,91
Manomètre Cailletet.				
Robinets.....	100	55	5.500,00	
Tube en acier.....	124,60 *m.*	4,50 le *m.*	560,70	6.060,70
Total pour le rez-de-chaussée.....				38.577,38

On a donc en résumé :

Plates-formes	569.251,23 *fr.*
Rez-de-chaussée et divers	38.577,38
Total	607.828,61 *fr.*

Nous donnons ci-après le résumé des dépenses faites par la Société de la Tour pendant son exploitation de 1889, et formant le complément de l'aménagement des mêmes plates-formes.

Dépenses faites par l'exploitation pour complément de l'aménagement des plates-formes.

DÉSIGNATION.	SOMMES PARTIELLES.	SOMMES TOTALES.
	Fr.	*Fr.*
Gaz, électricité, eau et téléphone.		
Beau, Bertrand, Taillet	32.223,00	
Papin	337,05	
Société générale des téléphones	12.046,45	46.594,95
Grivolas	1.351,05	
Tahan et Durand	570,00	
Veuve Pierre	66,80	
Serrurerie.		
Bernard	64.585,62	
Ponthus	5.000,00	69.645,62
Briant	60,00	
Menuiserie.		
Waaser	16.921,73	
Réteaux	1.075,15	
Crépel	9.373,65	
Gelin	550,00	
Deleuze	9.910,15	60.664,65
Pillet et Schmid	17.737,55	
Pombla	1.415,00	
Doucet	2.324,75	
Lepage	313,12	
Cerisay et fils	1.043,55	
A reporter		176.905,22

DÉSIGNATION.	SOMMES PARTIELLES.	SOMMES TOTALES.
	Fr.	*Fr.*
Report		176.905,22
Peinture.		
Rivière	23.054,98	27.701,13
Bassan	4.646,15	
Maçonnerie.		
Combaz	1.068,70	
Toisoul et Fradet	257,35	7.678,05
Gerbe	6.352,00	
Décoration.		
Staff (Vast)	1.908,00	1.908,00
Couverture et plomberie.		
Sansot	34.497,00	34.497,00
Matériel.		
Reprise à la maison Eiffel	240,00	
Bancs de chêne	1.260,00	
Tapis en linoléum	492,05	2.132,05
Strapontins d'ascenseur	140,00	
Divers	958,24	958,24
Honoraires.		
M. Guyenet ingénieur	430,00	
M. Sauvestre architecte	13.456,30	13.886,30
Total		265.665,99

La dépense totale qu'a entraîné l'aménagement des plates-formes est donc la suivante :

Dépenses faites par le service de la construction	607.828,61 *fr.*
» » de l'exploitation	265.665,99
Total général.	873.494,60 *fr.*

CHAPITRE III

PEINTURE DES FERS ET FONTES

§ 1. — Exécution du travail.

On ne saurait trop se pénétrer du principe que la peinture est l'élément essentiel de la conservation d'un ouvrage métallique et que les soins qui y sont apportés sont la seule garantie de sa durée.

Cette considération avait pour la Tour une importance toute spéciale, en raison du petit volume qu'avait chacun des éléments qui la composaient, de leur faible épaisseur et des intempéries exceptionnelles auxquelles ils étaient exposés.

On s'en est préoccupé tout d'abord dans le mode de construction, en rendant chacune des parties facilement accessibles afin de pouvoir faire en tout temps des visites destinées à reconnaître un commencement de rouille et à y remédier. Les arbalétriers, notamment, qui sont les parties les plus importantes et que l'on était forcé de constituer par des caissons fermés, ont une dimension telle que les hommes puissent y pénétrer; ils sont à cet effet munis d'échelles intérieures et de trous d'homme placés à chaque étage à peu de hauteur au-dessus des entretoises. Dès que, dans la partie supérieure de la construction, il a été possible de supprimer les caissons fermés, ils ont été remplacés par des sections en forme de cornières ou de simple T, telles que toutes les parois fussent visibles. Il en a été de même pour toutes les pièces secondaires formées par des caissons à jour en treillis dont l'entretien est des plus faciles.

Comme ce qui est le plus important est de s'opposer à un commencement de rouille, tous les fers pendant la fabrication à l'atelier furent conservés sous des hangars couverts, et au besoin soigneusement décapés; ils ne restèrent exposés à la pluie qu'après leur assemblage et qu'après avoir été revêtus sur toutes leurs surfaces extérieures, même celles qui devaient être recouvertes par des assemblages, par une bonne couche de minium de fer. On apporta les soins les plus minutieux à la pose de cette première couche, qui est la plus essentielle.

Au fur et à mesure du montage, on peignait la tête des rivets mis en place et on réparait les points où, par suite des manœuvres de levage, la première couche était dégradée.

Ensuite deux couches générales furent superposées à la première.

La composition de la peinture était la suivante :

Minium de fer rouge vif de Venise.	0,42 *kg.*
Huile de lin.	0,36
Huile de lin cuite.	0,22
Total.	1,00

L'huile de lin était de provenance du Nord, tirée à clair, exempte de tout mélange d'huiles minérales, d'acides, de résines ou de toute autre matière. Le minium devait être exempt de toutes matières étrangères. On s'assurait par des essais chimiques que toutes les matières étaient absolument pures.

Les deux couches furent posées par M. Nourrisson au prix de 2,93 *fr* par tonne de métal et par couche. — La pose de ces deux couches revint à la somme de 57.328,30 *fr*.

La quatrième et dernière couche fut également posée par M. Nourrisson avec des matières fournies par la Société des Gommes nouvelles et Vernis. — Elle donnait une peinture vernissée très épaisse, d'un aspect

extérieur très satisfaisant et d'une grande efficacité de protection. — Elle a été appliquée du 15 mars au 1er mai 1899 sur toutes les surfaces intérieures et extérieures des fers et fontes; n'en ont été exceptés que la frise décorative, les arcades en bois de la première galerie, les restaurants, les kiosques et les cages des ascenseurs, qui ont fait l'objet de marchés spéciaux passés avec M. Rivierre.

Les tons étaient d'une nuance brun rouge suivant échantillons; la nuance était variable de la base au sommet par tons dégradés en prenant les tons les plus foncés pour la partie inférieure.

Le prix convenu pour cette couche, avec une garantie de un an, était de 50.000 *fr* à forfait, ce qui correspondait à un prix moyen de 8,00 *fr* par tonne de métal environ. Il a été payé en outre, pour 1.290 tonnes supplémentaires, une somme de 10.592 *fr*; elle a donc coûté au total 60.592 *fr*.

Cette couche donna toute satisfaction, et ce n'est qu'en 1892 qu'on jugea utile de procéder à une réfection.

La Société de la Tour passa un marché avec M. Rivierre pour le décapage des parties qui pourraient être oxydées, la pose d'une couche au minium de plomb sur celles-ci, le lessivage et nettoyage général de toutes les autres parties, et enfin la pose d'une couche générale de peinture.

Celle-ci devait être formée de céruse garantie pure, d'huile de lin cuite première qualité et d'ocre (marque Parquin).

Le prix total à forfait a été de 57.000 *fr*, y compris garantie et entretien pendant cinq années. — Il ne s'appliquait ni aux parties déjà indiquées précédemment (restaurants, arcades, etc.), non plus qu'aux poutres sous le 1er et le 2me étage, aux faces intérieures des arcs et à l'intérieur des tronçons du sol au 2me étage, lesquelles n'avaient besoin d'aucune réfection.

Le marché suivit son cours régulier et ce n'est qu'en 1899, en vue de la nouvelle Exposition, que l'on dut repeindre à nouveau la Tour pour lui donner un aspect plus agréable.

On s'adressa à MM. Georges Hartog et Cie, fabricants de vernis et peinture émail, qui s'engagèrent à poser deux nouvelles couches de leur peinture spéciale avec cinq nuances dégradées partant du jaune orangé foncé pour passer au jaune clair au sommet, pour la somme à forfait de 80.000 *fr*, y compris garantie et entretien pendant sept années. Le mode de payement est le suivant : 40.000 *fr* le 1er mars 1900, 20.000 *fr* le 1er novembre 1903, 20.000 *fr* à la fin de la garantie, soit le 1er mai 1907.

Les peintures décoratives sont comme précédemment en dehors du forfait.

§ 2. — Dépenses.

Pose de la 2me et de la 3me couche de minium par M. Nourrisson.	57.328,30 *fr.*
» 4me couche par la Société des Gommes nouvelles.	60.592,88
Travaux divers de retouches pendant les travaux.	6 085,90
Supplément de peinture pour canalisation, ornements en zinc, à la Société des Gommes nouvelles.	565,74
Deux échafaudages spéciaux pour la galerie.	1.000,00
Total.	125.572,82 *fr.*

CHAPITRE IV

DÉPENSES D'ENSEMBLE ET PRIX DE REVIENT TOTAL DE LA TOUR

§ 1. — Dépenses d'ensemble.

En dehors des dépenses qui ont été énumérées, il en existe de très importantes qui n'ont pas d'applications spéciales et qui doivent incomber à l'ensemble des travaux.

Les principales sont : 1° l'installation des chantiers, 2° les dépenses d'entretien, 3° le matériel, 4° les frais généraux. Elles sont résumées dans le tableau ci-dessous :

NATURE DES DÉPENSES.	SOMMES PARTIELLES.	SOMMES TOTALES.
	Fr.	*Fr.*
1° Installation des chantiers.		
Enlèvement des arbres	2.855,90	
Terrassements et chemins d'accès	1.412,35	
Clôtures	3.702,95	
Baraques et bureaux	18.070,72	
Voies et plaques	139,70	
Frais divers pendant la durée des travaux	20.405,05	
Sondages et puits de reconnaissance	3.740,80	54.327,47
2° Dépenses d'entretien.		
Entretien du matériel	28.810,60	
Transports et charrois non répartis	2.219,45	
Service de l'électricité	4.609,70	
Bardages divers sur les chantiers	2.456,20	
Sorties de magasin non portées au livre de sortie.	10.072,10	
Service sanitaire :		
Excédent des dépenses par rapport aux retenues.	7.778,19	
Retenues du service de l'Exposition	5.000,00	
Indemnité à X	4.500,00	65.446,24
3° Matériel.		
Le montant du matériel fourni au chantier est de :		
Gros matériel 153.490,92		
Outillage 65.468,54	218.959,46	
Il a été rendu aux ateliers de Levallois :		
Gros matériel 90.142,95		
Outillage 11.012,38		
Il a été vendu à la Société de la Tour :		
Outillage 5.720,50	105.875,83	
La différence applicable aux travaux est de		112.083,63
Le gros matériel comprenait les principaux outils suivants :		
4 grues de montage 63.203,62		
Divers appareils de levage. 32.799,80		
Voies et wagonnets 4.459,06		
Gros matériel pour maçonnerie 14.646,00		
Deux machines et machines soufflantes 18.967,50		
(La presque totalité du matériel à air comprimé n'a pas été portée en compte.)		
4° Frais généraux.		
a) *Première période : jusqu'au 30 juin 1887 (six mois) (appliqués en entier à l'infrastructure).*		
Appointements (compris l'ingénieur, M. Nouguier, le chef de chantier et les employés, ainsi que le bureau d'architecture)	10.192,15	
de voiture	784,95	
B Entretien, frais et fournitures	2.055,90	
Magasin. Service et gardiennage	1.040,55	
A reporter	14.073,55	231.857,34

NATURE DES DÉPENSES.	SOMMES PARTIELLES	SOMMES TOTALES.
	Fr.	*Fr.*
Report	14.073,55	231.857,34
Part des frais généraux de l'usine (à 5.000 *fr* par mois)	30.000,00	
Divers	312,70	
Intérêts sur avances à 5 p. 100	1.203,44	
Total des frais généraux de l'infrastructure.		46.189,69
b) *Deuxième période : du 30 juin 1887 à l'achèvement (vingt-cinq mois).*		
Les appointements s'élevaient à 4.000 *fr* par mois, comprenant :		
Appointements de l'ingénieur, M. Nouguier 1.000		
— du personnel du chantier (voir p. 124) 1.890		
— du bureau des études d'architecture 1.100		
La dépense réelle a été de	95.076,55	
à laquelle doivent être ajoutées les gratifications.	34.145,65	
Total	129.222,20	
Frais de voyage et voitures	4.219,30	
Ports de lettres et dépêches	989,40	
Frais et entretien des bureaux	7.103,91	
Fournitures de bureaux	1.918,71	
Frais de représentation	6.865,35	
Photographies et dessins	7.054,39	
Brochures et journaux	1.323,00	
Locations et indemnités de logement	1.049,80	
Secours (en dehors du service sanitaire)	602,40	
Gardiennage et service des magasins	14.787,95	
Subvention pour repas des ouvriers	5.418,80	
Banquets et fêtes	4.630,80	
Assurances	1.854,82	
Frais de procédure	22.758,72	
Honoraires de vérification	2.107,78	
Études, modèles et essais antérieurs aux travaux.	35.112,03	
Attribution à M. Sauvestre pour études	30.000,00	
Attribution à MM. Nouguier et Koechlin	102.830,00	
Part des frais généraux de l'usine : 22 mois 1/2 à 5.000 *fr*	112.500,00	
Divers	1.675,58	
Total	494.030,94	
A ce chiffre doit être ajouté celui des intérêts à 5 p. 100 sur les sommes avancées.		
Du 30 juin au 31 décembre 1887 31.639,43		
Du 1er janvier au 30 juin 1888 58.508,32		
Du 1er juillet au 31 décembre 1888 86.341,57		
Du 1er janvier au 30 juin 1889 80.237,70		
Total des intérêts	256.727,02	
Total des frais généraux de la superstructure.		750.757,96
Total		1.028.804,99

Les dépenses générales s'élèvent donc à :

Installation des chantiers.	54.327,47 *fr.*
Dépenses d'entretien.	65.446,24
Matériel.	112.083,63
Frais généraux de l'infrastructure.	46.189,69
» de la superstructure.	750.757,96
Total des frais d'ensemble. . . .	1.028.804,99 *fr.*

Nous avons déjà compté dans le prix de revient du montage une somme de 72.250 *fr.* pour frais généraux. — La nouvelle somme représentant les frais d'ensemble doit être diminuée d'autant et est de 956.554,99 *fr.*

§ 2. — Prix de revient total de la Tour.

En réunissant à ces frais d'ensemble les diverses sommes énumérées précédemment pour les travaux, on obtient le prix de revient total de la Tour, lequel est le suivant :

1° Infrastructure. Fondation et maçonneries.	493.373,48 *fr.*	
Soubassements	147.054,14	
Maçonnerie supplémentaire.	25.652,90	
	666.080,52 *fr.*	
Sabots et contre-sabots d'appui.	35.046,56	701.127,08 *fr.*
2° Superstructure. Fourniture des fers et fontes.	3.000.676,56	
Montage » »	847.399,00	
(*Y compris échafaudages et 72.250 fr de frais généraux.*)		
Organes mécaniques.	1.153.145,91	
Plates-formes.	607.828,61	
Peinture.	125.572,82	5.734.622,90
3° Frais d'ensemble		956.554,99
Total.		7.392.304,97 *fr.*

Tel est l'ensemble des dépenses payées par M. Eiffel.

Le service de l'exploitation a lui-même dépensé une somme de :

Pour les appareils mécaniques.	141.430,35 *fr.*
Pour les plates-formes.	265.665,99
Total.	407.096,34 *fr.*

En résumé, la Tour, telle qu'elle a fonctionné pendant l'Exposition, a coûté :

A M. Eiffel.	7.392.304,97 *fr.*
A la Société de la Tour.	407.096,34
Total général. . . .	**7.799.401,31** *fr.*

CHAPITRE V

EXPLOITATION

§ 1. — Formation de la Société de la Tour Eiffel.

Vers la fin de l'année 1888, le montage de la Tour était presque achevé et il ne manquait plus que quelques-uns des panneaux supérieurs et le couronnement.

Toutes les difficultés étaient donc vaincues et j'étais assuré d'arriver, sans retard sensible, à l'achèvement définitif.

Aussi, désireux de m'épargner les préoccupations de surveillance d'une exploitation qui ne rentrait pas dans mes habitudes de constructeur, je résolus de fonder une Société spéciale qui se chargerait de ce soin et à laquelle je rétrocéderais les travaux exécutés, ainsi que les droits qui m'étaient conférés par ma concession.

Le succès universel de curiosité qu'obtenait déjà la Tour pendant son exécution m'était une sûre garantie qu'elle devait être, pendant l'Exposition, extrêmement visitée, et qu'envisagée comme une affaire, elle devait être une excellente opération pour la Société qui se chargerait de son exploitation.

Je tenais en outre, et de la manière la plus essentielle, à ce que mes apports ne fissent l'objet d'aucune des majorations que présentent souvent des affaires de ce genre. Aussi j'évaluai de la façon la plus modérée les dépenses qui me restaient à faire et je portai le prix complet de la Tour et de ses accessoires, tels qu'ils étaient décrits à l'acte de concession, au chiffre très bas de 6.500.000 *fr.*

Comme je devais recevoir 1.500.000 *fr* de subvention de l'État, les travaux exécutés ne représentaient plus que le complément, soit une somme de 5.000.000 de francs, et c'est à cette somme que j'avais fixé le capital de la Société à constituer.

Nous avons vu précédemment qu'en réalité les dépenses ont excédé mes prévisions et se sont élevées à 7.392.302,97 *fr*, soit un excédent de 892.302,97 *fr*. Cet imprévu, auquel je n'avais pas fait une assez large part, tenait à mille détails d'installation dont il était bien difficile de se rendre compte à l'avance, et c'est la Société qui en a bénéficié.

En outre, je ne voulais me réserver aucune part quelconque du bénéfice *avant que les premiers actionnaires fussent complètement remboursés.*

Ce n'est qu'à partir de ce moment que les recettes devaient, déduction faite des frais d'exploitation et d'administration, être partagées en parts égales entre les actionnaires et moi-même.

Avec le concours de la Banque franco-égyptienne, de la Société générale et du Crédit industriel et commercial, je fondai, le 31 décembre 1888, la Société de la Tour Eiffel, dont les statuts portent :

M. Eiffel apporte à la Société le droit à la jouissance de l'exploitation de la Tour Eiffel pendant l'année de l'Exposition et pendant les vingt années qui suivront, tel que ce droit lui a été concédé par la convention du 8 janvier 1887 avec l'État.

Il s'oblige à achever, dans les délais et conditions fixés par lesdites conventions, l'installation complète de la Tour et de ses accessoires, tels qu'ils sont définis par la convention avec l'État.

Ces constructions et installations seront faites par M. Eiffel de ses deniers, en y comprenant la somme à lui allouée sur les crédits de l'Exposition.

M. Eiffel se réserve, pendant toute la durée de l'exploitation, la jouissance exclusive de la partie supérieure de la Tour, en dehors de la partie accessible au public, étant entendu que cette jouissance ne pourra faire pour lui l'objet d'aucun profit en argent.

Le fonds social est fixé à 5.100.000 *fr* divisé en 10.200 actions de 500 *fr* chacune.

Sur les produits nets, déduction faite de toutes les charges, c'est-à-dire sur les bénéfices, il sera prélevé 5 p. 100 pour fonds de réserve, ou telle portion des bénéfices qui sera jugée convenable par l'assemblée générale.

Tout surplus des bénéfices est affecté à l'amortissement des actions, jusqu'à ce que chacune d'elles ait reçu remboursement de 500 fr. Aucune distribution à titre d'intérêt ou de dividende n'aura lieu jusque-là.

Après remboursement de l'intégralité du capital, les titres des actions seront remplacés par les actions de jouissance et les bénéfices se répartiront alors de la manière suivante :

50 p. 100 pour les actionnaires et 50 p. 100 à M. Eiffel ou à ses ayants droit.

Ces 50 p. 100 des bénéfices attribués à M. Eiffel pourront être divisés en parts et représentés par des titres, dont le nombre, la forme et le mode de transmission seront fixés par le premier Conseil d'administration de la Société.

Leur nombre a été déterminé égal à celui des actions, soit 10.200.

Il résulte de ces stipulations que, le capital primitif ayant été intégralement remboursé dès la première année et le nombre des actions de jouissance qui remplacent les premières étant resté de 10.200, les bénéfices suivants sont partagés par parts égales entre les actions de jouissance et les parts bénéficiaires.

La Société fut définitivement constituée à la date du 4 mars 1889 et le premier Conseil d'administration fut composé comme suit :

MM. G. Eiffel, Président; Couder, Directeur général honoraire de la Comptabilité publique; Gabriel Thomas, Administrateur délégué; Prègre (Arthur), Directeur de la maison Fould-Dupont, à Paris; Salles (Adolphe), Ingénieur, Administrateur délégué de la Compagnie des Établissements Eiffel.

Commissaires : MM. Charton (Jules); E. Truelle; Moïse Dreyfus.

§ 2. — Recettes de l'exploitation.

L'Exposition universelle de 1889 s'ouvrit officiellement le 6 mai, mais ce n'est que le 15 mai que la Tour fut ouverte au public. En outre, comme les divers ascenseurs n'ont pu fonctionner de suite, mais à des époques successives, le public dut monter à pied par les escaliers, savoir :

Au 1er étage jusqu'au 27 mai, date de la mise en service des ascenseurs Combaluzier.

Au 2me étage jusqu'au 4 juin, date de la mise en service de l'un des ascenseurs Otis; le second a été livré le 22 juin.

Enfin, l'ascenseur Edoux n'ayant été mis en service que le 13 juin, on n'a pu avant cette date monter au sommet.

Il a été dit précédemment que les prix d'entrée étaient pendant la semaine :

1er étage	2 *fr.*	Total 5 *fr.*
2me » en plus	1 *fr.*	
3me » »	2 *fr.*	

A partir du 7 novembre, lendemain du jour de la clôture de l'Exposition, le prix d'entrée pour le 1er étage a été réduit à 1 *fr* et celui de l'ascension totale à 4 *fr.*

Pour les dimanches et jours fériés, les prix fixés par le cahier des charges de la concession sont les suivants :

1er étage	0,50 *fr.*	Total 2 *fr.*
2me » en plus	0,50 *fr.*	
3me » »	1 *fr.*	

Ces prix n'ont été perçus qu'un seul jour, le dimanche 16 juin; mais l'affluence des visiteurs fut telle ce jour-là qu'elle inspira des craintes à l'Administration de l'Exposition, qui dut consentir, en vue de prévenir le désordre résultant de cette affluence, à doubler le prix de 2 *fr* primitivement fixé, à la condition que le bénéfice résultant de cette mesure serait partagé entre ladite Administration et la Société de la Tour. Par suite, les prix des dimanches et fêtes furent fixés de la manière suivante :

1er étage	1 *fr.*	Total 4 *fr.*
2me » en plus	1 *fr.*	
3me » »	2 *fr.*	

Ces prix n'étaient perçus que de 11 heures du matin à 6 heures du soir. En dehors de ces heures, le prix normal de la semaine s'appliquait.

Produit des ascensions. — Nous empruntons les chiffres qui vont suivre au remarquable rapport présenté au Conseil d'administration par M. Couder, qui a été chargé de l'organisation du service des recettes de toutes natures, service qui a parfaitement fonctionné.

Le nombre des visiteurs payants se répartit ainsi :

1.968.287	visiteurs ayant fait l'ascension du	1er étage.
1.283.230	» »	2me »
579.384	» »	3me »

Ces nombres peuvent se décomposer autrement :

685.057 visiteurs s'arrêtant au 1er étage.
703.846 » » 2me »
579.384 » » 3me »
1.968.287 au total.

Les deux journées où le nombre des visiteurs a été le plus élevé sont : celle du 10 juin (lundi de la Pentecôte), 23.202 visiteurs, et celle du dimanche 18 août, 18.950 visiteurs.

La semaine où l'affluence a été la plus grande est celle du 11 au 17 septembre. Elle a donné 110.905 visiteurs, soit une moyenne de 15.900 visiteurs par jour.

Le tableau ci-dessous résume le nombre des entrées par mois :

Du 15 au 31 mai 1889	87.453
» 1er au 30 juin 1889	341.725
» 1er au 31 juillet 1889	342.068
» 1er au 31 août 1889	406.430
» 1er au 30 septembre 1889	409.793
» 1er au 31 octobre 1889	305.745
» 1er au 30 novembre 1889	74.473
Total	1.968.287

Le mois le plus productif a été celui de septembre, pour lequel le nombre des visiteurs a atteint 409.793, donnant une moyenne de 13.600 visiteurs par jour.

Cette affluence des visiteurs a été facilitée par le beau temps exceptionnel qui a régné, sauf en mai, d'une manière générale pendant toute l'Exposition.

Du 15 mai au 2 novembre, on a relevé 72 jours beaux, 57 incertains, 42 mauvais par suite de pluie ou vent, de sorte que, sur 171 jours, il n'y en a eu que le quart pendant lesquels les ascensions ont été plus ou moins partiellement contrariées.

Le produit des entrées, au moyen tant des escaliers que des ascenseurs, s'est élevé à la somme brute de 5.983.930 *fr*, dont il y a lieu de déduire la somme retenue par l'Administration de l'Exposition pour les dimanches et fêtes, comme il a été dit plus haut, soit 64.046 *fr*.

Ce qui réduit le produit des entrées à 5.919.884 *fr*. qui se décompose ainsi :

Recettes de la semaine conformément au tarif	5.030.155,00 *fr*.
Recettes des dimanches et jours de fêtes au tarif	850.052,50
Recettes des fêtes extraordinaires (tarif exceptionnel)	24.353,00
Produit des billets à moitié prix	15.023,00
Produit des carnets d'ascension (à 50 *fr*)	300,00
Total égal	5.919.884,00 *fr*.

Ce même chiffre se décompose également comme suit, d'après les tableaux détaillés des recettes par étage portés au rapport :

Visiteurs s'arrêtant au	1er	étage,	685.057	pour un produit de	1.246.803,74 *fr*.	Rapport p.	100 : 21
»	2me	»	703.846	»	1.970.768,80	»	33
»	3me	»	579.384	»	2.702.311,46	»	46
			1.968.287		5.919.884,00 *fr*.		100

Le produit moyen d'un visiteur est de 3 *fr*. et équivaut à celui d'un visiteur s'arrêtant à la 2me plate-forme.

Un service direct était organisé pour monter sans arrêt du sol à la 2me plate-forme. — Le nombre de voyageurs qui en ont profité a été de 294.001 sur 1.283.230, soit environ 23 p. 100.

Nous donnons ci-contre le tableau qui fournit le relevé des recettes pour chaque semaine.

Recettes hebdomadaires.

DATES.	NOMBRE TOTAL DES ASCENSIONS. 1er ÉTAGE.	2e ÉTAGE.	3e ÉTAGE.	PRODUIT DES ENTRÉES. PRODUIT BRUT.	A DÉDUIRE : PART REVENANT A L'EXPOSITION SUR LA RECETTE DU DIMANCHE.	PRODUIT NET.
1re semaine. 15 au 21 mai 1889	29.922	17.437	»	64.282 »	»	64.282 »
2e » 22 au 28 »	35.433	18.328	»	75.675,50	»	75.675,50
3e » 29 mai au 4 juin 1889	59.703	29.791	»	123.032 »	»	123.032 »
4e » 5 au 11 »	85.246	43.022	»	172.933,50	»	172.933,50
5e » 12 au 18 »	85.609	49.720	14.594	236.033 »	»	236.033 »
6e » 19 au 25 »	81.673	52.654	22.609	246.060 »	2.489 »	243.571 »
7e » 26 juin au 2 juillet 1889	70.248	40.919	25.180	226.785 »	2.481 »	224.304 »
8e » 3 au 9 »	73.110	48.369	25.591	239.369 »	2.859 »	236.510 »
9e » 10 au 16 »	96.057	65.209	29.334	310.592 »	2.505 »	308.087 »
10e » 17 au 23 »	81.374	57.216	20.668	268.350 »	2.883 »	265.467 »
11e » 24 au 30 »	63.420	43.496	25.878	210.611 »	2.829 »	207.782 »
12e » 31 juillet au 6 août 1889	83.310	54.698	28.347	265.652,50	2.511 »	263.141,50
13e » 7 au 13 »	85.513	58.289	26.248	268.295 »	1.936 »	266.359 »
14e » 14 au 21 »	104.518	71.517	29.761	312.067,50	5.713 »	306.954,50
15e » 21 au 27 »	93.582	65.834	29.286	298.325,50	2.912 »	295.413,50
16e » 28 août au 3 septembre 1889	94.775	65.782	33.636	307.770,50	3.471 »	304.299,50
17e » 4 au 10 »	108.799	73.047	37.530	347.824,50	4.102 »	343.722,50
18e » 11 au 17 »	110.905	75.144	35.505	353.381,50	3.585 »	349.796,50
19e » 18 au 24 »	81.529	57.321	30.206	269.996 »	3.301 »	266.695 »
20e » 25 septembre au 1er octobre 1889	73.689	49.606	27.925	242.539 »	3.109 »	239.430 »
21e » 2 au 8 »	68.759	47.201	26.664	225.055,50	3.424 »	221.631,50
22e » 9 au 15 »	77.809	52.979	25.496	244.998,50	3.275 »	241.723,50
23e » 15 au 22 »	64.999	43.988	24.340	211.692 »	3.069 »	208.623 »
24e » 23 au 29 »	66.203	40.497	20.893	200.028,50	3.037 »	196.991,50
25e » 30 octobre au 5 novembre 1889	62.044	38.172	21.126	187.415 »	4.555 »	182.860 »
26e » 6 au 12 »	20.272	10.105	4.943	52.835,50	»	52.835,50
27e » 13 au 19 »	4.041	2.591	1.704	8.477,50	»	8.477,50
28e » 20 au 26 »	3.965	2.804	1.912	7.752,50	»	7.752,50
29e » 27 au 30 »	1.780	1.404	1.008	5.200 »	»	5.200 »
Totaux	1.968.287	1.283.230	579.384	»	»	»
Carnets d'ascension à 50 *fr*	»	»	»	300 »	»	300 »
Totaux	»	»	»	5.983.930 »	64.046 »	5.919.884 »

Les deux plus fortes recettes journalières sont celles du lundi 9 septembre pour 60.756 *fr* et du lundi 16 septembre pour 59.437 *fr*.

Les recettes hebdomadaires qui ont été les plus élevées sont celles de la 18me semaine (11 au 17 septembre) pour 349.796,50 *fr*, soit une moyenne de 49.971 *fr* par jour, et celle de la 17me semaine (4 au 10 septembre) pour 343.722,50 *fr*, soit une moyenne de 49.103 *fr* par jour.

La moyenne générale par semaine, du 15 mai au 5 novembre, a été de 233.812,74 *fr*, ce qui donne par jour une moyenne de 33.400 *fr*.

Produit des restaurants. — Les redevances des restaurants ont pour base un prélèvement proportionnel sur les recettes brutes de chaque journée. Ces redevances ont produit la somme totale de 457.686,90 *fr* ainsi répartie :

Grande brasserie Lorraine (M. Lévy Maurice, concessionnaire)	25 p. 100	136.235,70 *fr*.
Grand restaurant Russe (M. Raffestin, concessionnaire)	25 »	107.557,15
Restaurant Américain (MM. Spiers et Pond, concessionnaires)	20 »	35.383,10
Boulangerie Viennoise (M. Jacquet, concessionnaire)	20 »	24.277,40
Restaurant Brébant (M. Rosembaum, concessionnaire)	20 »	132.203,15
Total		455.656,50 *fr*.
A ajouter du 7 au 30 novembre		2.030,40
Total		457.686,90 *fr*.

Ces recettes se décomposent par mois d'après le tableau suivant :

Mai	34.115,20 *fr*.
Juin	107.624,00
Juillet	77.620,30
Août	75.168,00
Septembre	93.908,10
Octobre	61.703,10
Novembre	7.548,20
Total	457.686,90 *fr*.

On voit que ce sont les mois de juin et septembre qui ont donné lieu aux plus fortes recettes.

Produit des concessions diverses. — Le droit concédé à divers industriels de vendre certains objets à l'intérieur de la Tour a fait l'objet de traités stipulant, au profit de la Société, des redevances proportionnelles au montant des recettes brutes réalisées par les concessionnaires.

Ces redevances se sont élevées à la somme totale de 104.427,65 *fr*, provenant des opérations ci-après :

1° Vente de médailles, épingles, broches, tours, etc. (MM. Duperron et Devic, concessionnaires).	22.934,30 *fr.*
2° Vente de la brochure G. Tissandier (M. G. Masson, concessionnaire)	2.289,00
3° Vente du Guide officiel de la Tour (M. G. Simon, concessionnaire)	3.589,25
4° Location de lorgnettes, jumelles et instruments d'optique (M. Monteux, concessionnaire jusqu'au 6 novembre et régie directe par la Société à partir du 7 novembre)	11.369,20
5° Vente de photographies, albums et Sténopes (M. Neurdein, concessionnaire)	56.870,30
6° Débit de tabac (Mme Bravard, concessionnaire)	1.556,60
7° Vente de verres gravés (MM. Kaleski frères, concessionnaires)	5.475,00
8° Publicité dans la Tour (Veuve Crespin et Dufayel, concessionnaires)	344,00
Total	104.427,65 *fr.*

Produit des distributeurs automatiques. . . . . . 9.848,35 *fr.*

Produit des ventes directes de « Souvenirs ». — La vente des objets qui n'ont pas donné lieu à des concessions a été faite par la Société qui a acheté lesdits objets aux fournisseurs et les a vendus directement au public.

Le prix des objets achetés étant de.	42.130,95 *fr.*
et le produit brut des ventes faites au public s'élevant à.	63.572,15
il en résulte pour la Société un bénéfice net de.	21.441,20 *fr.*

Intérêts de fonds placés. — Le chiffre s'en est élevé à. . . . . 10.559,30 *fr.*

Résumé. — En résumé, les recettes générales de l'exploitation se sont élevées à :

Recettes nettes aux guichets (5.983.930 moins 64.046 *fr*).	5.919.884,00 *fr*
Restaurants et bars.	457.686,90
Concessions diverses.	104.427,65
Ventes directes.	21.441,20
Distributeurs automatiques.	9.848,35
Intérêts des fonds placés.	10.559,30
Total des recettes.	6.523.847,40 *fr.*

(Le rapport du Conseil d'administration porte le total des recettes à 6.687.893,40 *fr*, parce qu'il y figure :
1° Une somme de 100.000 *fr* pour versements en espèces sur 200 actions ;
2° La somme de 64.046 *fr* reversée à l'Exposition et portée comme dépenses.)

§ 3. — Frais généraux de l'exploitation.

Personnel. — Les dépenses de personnel se sont élevées à 286.428,60 *fr* avec un nombre de 242 agents. Ces chiffres sont décomposés comme suit :

DÉSIGNATION.	NOMBRE D'AGENTS.	TRAITEMENTS.	GRATIFICATIONS.	TOTAL.
		Fr.	*Fr.*	*Fr.*
Administration centrale	10	23.018,20	13.080,00	36.098,20
Service de perception	20	17.486,45	6.342,00	23.828,45
Service du contrôle	117	90.093,85	15.726,00	105.819,85
Service technique et de traction, y compris ingénieurs conseils	84	98.722,05	16.207,00	114.929,05
Service d'optique	5	432,15	150,00	582,15
Service téléphonique	6	4.334,00	836,00	5.170,00
Totaux	242	234.087,60	52.341,00	286.428,60

Fournitures de bureau. — Elles se sont élevées à la somme de. 9.569,85

A reporter. . . . . . 295.998,45 *fr.*

Report. . . . . 295.998,45 *fr.*

Menues dépenses diverses. — Elles se sont élevées à 7.170,26

Balayage. — L'indemnité accordée au personnel employé au balayage et, en dehors des heures réglementaires, l'enlèvement des ordures (1.404 *m³* à 2 *fr*), ainsi que les ustensiles, ont donné une dépense de 16.032,95 *fr*, moins remboursement par les concessionnaires de 2.073,00 *fr*. 13.959,95

Abonnement à la Compagnie des Eaux.

Eau de source	20.562,5 *m³* à 0,20 *fr* (moyen)	4.187,60 *fr.*
Eau de rivière	212.239 *m³* à 0,125 *fr* (moyen)	24.599,65
Total		28.787,25
Remboursement par les restaurants		2.544,00
Reste		26.243,25

Impôts, loyers et assurances. — En y comprenant une somme de 5.000 *fr* pour location des bureaux rue Pasquier, et une somme de 1.000 *fr* pour location de l'emplacement de la Tour au Champ de Mars, ce chapitre s'est élevé à 9.244,45

Éclairage. — Les dépenses d'éclairage au gaz et à l'électricité se sont élevées à. . . . . 12.046,75 *fr.*
dont à déduire la part incombant aux restaurants 6.653,00
Reste net. 5.393,75

Débets, non-valeurs et restitutions. 938,25
Frais de voitures. 6.204,90
Frais de police. 6.391,50

Indemnités, souscriptions et donations. — Ces indemnités s'appliquent principalement aux détériorations de vêtements et s'élèvent à. 2.318,75

Phare électrique (entretien). — La dépense est la suivante :

Éclairage	13.913,40 *fr.*	
Crayons	1.002,30	
Location de lampes Gramme	615,75	
Peinture et vernis des projecteurs	47,55	
Total		15.609,00

Matériel de perception. — Les fournitures de tickets à 1,75 *fr* le mille, ainsi que les pinces à perforer, donnent une somme de. 7.868,25

Chauffage des machines. — Ce chauffage comprend :

Fourniture de coke : 1.032 tonnes à 27,20 *fr* plus octroi	28.190,80 *fr.*	
Charbon de forge : 4 tonnes à 34,30 *fr*	146,05	
Briquettes à 32 *fr* les 1.000 *kg* et divers	244,20	
Total		28.581,05

Habillement des agents. — Cette dépense s'est élevée à. 20.568,05

Réceptions officielles. — Ces frais comprennent les médailles distribuées, ainsi que les photographies et leurs cartables, pour une somme de. 5.039,15

Service de Caisse (au Crédit Industriel). 1.000,00
Total 452.529,01

A déduire : Frais de transport des marchandises par les ascenseurs remboursés par les concessionnaires. 7.248,00
Amendes et recettes accidentelles. 2.304,20
Total. 9.552,20
Total des frais généraux. . . . . 442.976,81 *fr.*

A ces frais généraux s'ajoutent les dépenses suivantes :

Publicité.	110.215.00 *fr.*
Entretien des machines et outillage.	52.627,39
Agio sur obligations du Trésor.	3.875,00
Conseil d'administration et Commissaires des comptes (30.000 *fr* plus 3.000 *fr.*)	33.000,00
Total des dépenses diverses.	199.717,39 *fr.*

En outre, il a été porté comme frais de premier établissement les sommes suivantes :

Frais de constitution de la Société	14.099,40 *fr.*	
Mobilier et matériel	35.626,85	
Machines, entretien et outillage	31.966,15	
Installations et aménagements	271.437,08	
Phare électrique	72.426,90	
Matériel de perception	4.560,35	
Total	430.116,73 *fr.*	
A déduire : estimation actuelle	100.000,00	
Il a donc été porté pour amortissement		330.116,73 *fr.*

Récapitulation. — En résumé, les recettes de toute nature résultant de l'exploitation de la Tour se sont élevées à la somme totale de. . . . . 6.523.847,40 *fr.*

Les dépenses ont été les suivantes :

Frais généraux de l'exploitation.	442.976,81 *fr.*	
Dépenses diverses.	199.717,39	
Amortissement du compte de premier établissement.	330.116,73	972.810,93
Les bénéfices nets de l'exercice 1889 s'élèvent donc à.		**5.551.036,47** *fr.*

(Le solde bénéficiaire porté au rapport est de 5.651.036,47 *fr* et comprend le versement de 100.000 *fr* en espèces sur 200 actions.)

Sur cette somme, il a été prélevé 5.100.000 *fr* pour le remboursement intégral du capital social.

§ 4. — Exploitation de 1890 à 1898.

Nous n'entrerons pas dans le détail de l'exploitation qui a suivi l'Exposition, et nous présenterons simplement les tableaux ci-dessous, qui donnent :

1° Par chaque année, le nombre des ascensions, ainsi que les recettes des diverses catégories;

2° Celui des frais généraux d'exploitation, qui sont détaillés comme il a été fait pour l'année 1889.

Tableau général des recettes.

ANNÉES.	1890.	1891.	1892.	1893.	1894.	1895.	1896.	1897.	1898.	1899.	TOTAUX.
NOMBRE DES ASCENSIONS.	393.414	335.629	277.276	265.894	210.836	218.974	226.654	199.827	183.391		2.312.095
	Fr.	*Fr.*	*Fr.*	*Fr.*	*Fr.*	*Fr.*	*Fr.*	*Fr.*	*Fr.*		*Fr.*
Recettes au guichet.....	696.394,50	586.854 »	471.094,50	446.021,25	360.377,25	368.967 »	372.486 »	325.542,25	293.953,25		3.921.690 »
Concessions diverses.....	28.411,17	18.149,05	23.382,09	22.521,52	18.262,88	19.648,42	19.207,07	16.946,62	15.579,11		182.168,83
Produit net des deux restaurants.....	49.921,53	32.518,85	51.559,90	40.729,45	22.572,14	30.638,60	30.419,40	24.044,90	23.154,30		305.559,07
Produit net de la vente de souvenirs.....	14.111,09	7.518,19	4.190,95	4.196,44	4.335,70	4.819,46	6.063,62	5.380,89	4.551,21		55.200,55
Produit net des distributeurs automatiques.....	5.085,05	3.460,37	3.517,28	3.368,47	2.654,65	2.774,04	3.418,75	3.169,68	2.919,33		30.367,62
Recettes extraordinaires...	35.000 »	»	»	»	»	»	»	»	»		35.000 »
Intérêts de fonds placés...	13.538,70	12.035,95	11.674,85	11.511,58	11.918,54	12.776,45	13.646,62	14.649,95	11.540,15		113.292,79
Produit net du service d'optique.....	»	124,95	25,35	227,45	»	750,27	»	»	»		1.128,02
Produit net de la vente du matériel des restaurants.	»	»	»	»	»	»	14.000 »	»	»		14.000 »
Produit net de la vente du pavillon.....	»	»	»	»	»	»	»	»	10.000		10.000 »
	842.462,04	660.661,36	565.444,92	528.576,16	420.121,16	440.374,24	459.332,36	389.734,29	361.700,35		4.668.406,88

Il résulte de ce tableau que, pendant les neuf années qui ont suivi l'Exposition, le nombre des visiteurs a été de 2.312.095, soit une moyenne de 256.900 par an.

Le total des recettes, pendant la même période, a été de 4.668.406,88 *r*, soit une recette moyenne de 518.500 *fr* par an.

Tableau récapitulatif des frais généraux d'exploitation.

NATURE DES DÉPENSES.	1890.	1891.	1892.	1893.	1894.	1895.	1896.	1897.	1898.	1899.	TOTAUX.
	Fr	Fr.	Fr.	Fr.	Fr.	Fr.	Fr.	Fr.	Fr.		Fr.
Personnel	163.188,25	140.233,30	123.096,90	120.568,68	108.633,10	104.581,04	105.034,92	106.871,43	104.025,88		1.076.233,50
Mobilier, matériel et fournitures de bureau	4.318,05	2.570,70	1.211,60	1.617 »	1.444,05	1.071,85	1.031,65	1.173,15	1.582,85		16.020,90
Menues dépenses	5.392,23	2.827,76	3.031,91	2.275,60	1.547,06	2.556,02	2.125,90	2.215,60	3.074,15		25.016,23
Abonnement aux eaux	9.604,48	9.398,80	8.883,25	6.068,91	7.393,63	6.128,18	6.011,25	5.864,50	5.888,88		65.241,88
Balayage et nettoyage	11.304,60	6.625,85	5.507 »	4.021,45	3.063,55	2.087,50	2.110,60	2.131,85	2.140,70		38.993,10
Éclairage et électricité	34.489,04	14.728,85	6.720,42	3.535,70	2.174,25	2.115,15	2.948,20	2.485,60	1.939,65		71.136,86
Impôts, loyers et assurances	10.725,15	8.905,55	9.342,05	9.224,62	9.203,49	7.444,85	8.554,78	8.052,69	13.307,58		84.760,76
Abonnement pour couverture et plomberie	2.000 »	2.000 »	2.000 »	1.365,35	92,60	69,70	»	»	»		7.527,65
Débets, non-valeurs et restitutions	360,35	24,35	437,08	1.428,17	44,07	1.074,10	1.556,65	1.849,78	1.194,50		7.969,05
Frais de voitures	6.490,05	6.396,20	6.398,90	6.359 »	6.245,40	6.335,70	6.292,15	6.220,40	6.486,30		57.224,10
Abonnement au téléphone	1.620 »	2.167,55	1.772,75	1.696,50	1.762 »	1.231,50	933,65	979,80	926,60		13.090,35
Indemnités, souscriptions et donations	1.796 »	560 »	100 »	20 »	»	75 »	50 »	57 »	950 »		3.608 »
Machines, entretien et outillage	24.693,04	18.858,62	6.275,78	»	»	»	»	»	»		49.827,44
Phare électrique	3.083,65	»	»	»	»	»	»	»	»		3.083,65
Matériel de perception	954,60	913,75	882,25	678,75	570 »	267,50	192,50	212,85	70 »		4.742,20
Chauffage des machines	23.517,85	20.331,75	17.421,65	23.276,78	20.928,84	20.137,53	21.254,62	20.300,47	21.479,09		188.648,58
Dépenses d'habillement	3.610,05	5.103,50	2.893,95	3.214,45	2.967,45	2.821,90	2.768 »	2.857,30	2.572 »		28.808,60
Abonnement au timbre	5.712,61	5.693,60	5.692,60	5.692,85	5.692,60	5.692,85	5.692,85	5.692,85	5.692,85		51.255,66
Service des titres au Crédit industriel et commercial	1.000 »	1.000 »	1.000 »	1.000 »	1.000 »	1.000 »	1.000 »	1.000 »	1.000 »		9.000 »
Pavillon du Champ de Mars	5.149,75	1.703,70	»	»	»	»	»	»	»		6.853,45
Entretien des ascenseurs	»	6.607,65	6.031,20	5.508,65	2.678,75	3.193,20	3.706,15	2.292,10	2.076,50		32.094,20
Dépenses diverses d'entretien	»	1.223,35	2.910,25	2.455,15	308,40	939,35	538,05	562,95	295 »		9.232,50
Service d'optique	»	»	»	»	347,75	»	»	»	»		347,75
Délégation et Direction	»	»	»	»	»	6.120 »	6.120 »	6.120 »	»		18.360 »
Participation Franck	»	»	»	»	»	»	734 »	1.037,50	»		1.771,50
	319.009,75	257.874,83	211.609,54	200.007,61	176.096,99	174.942,92	178.655,92	177.977,82	174.702,53		1.870.877,91
A déduire	5.069,11	5.013,11	878,37	902,56	549,86	1.209,82	1.825,31	443,86	1.078,94		16.970,94
Total des frais généraux d'exploitation	313.940,64	252.861,72	210.731,17	199.105,05	175.547,13	173.733,10	176.830,61	177.533,96	173.623,59		1.853.906,97

Les frais généraux de l'exploitation ont donc été constamment en s'atténuant et ont passé de 313.940,64 *fr* à 173.623,59 *fr*; ce chiffre paraît être la limite inférieure de ceux-ci.

Le total s'élève pour les neuf années à 1.853.906,97 *fr*, soit une moyenne par année de 206.000 *fr*.

Mais, en dehors des frais généraux d'exploitation, il y a certaines catégories de dépenses, telles que celles pour constructions nouvelles ou transformations des anciennes (la salle des fêtes notamment), ainsi que les frais du Conseil d'administration, qui viennent chaque année sensiblement réduire la part disponible sur la différence des sommes portées dans les tableaux ci-dessus.

Les dividendes réellement distribués, ainsi que les fonds mis en réserve, comme réserves statutaires et fonds de prévoyance, sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Répartition des bénéfices réalisés depuis 1890.

ANNÉES.	BÉNÉFICES.		DIVIDENDES DISTRIBUÉS.	FONDS DE PRÉVOYANCE.	RÉSERVES STATUTAIRES.
		Fr.	*Fr.*	*Fr.*	*Fr.*
1889.....	Reliquat.....	168.484,65	»	»	»
1890.....	Bénéfice..... ...	165.109,35	»	»	»
		333.594,00	306.000 »	15.000 »	8.255,47
1891.....		233.732,03	224.400 »	»	11.686,60
1892..		213.313,50	204.000 »	»	10.665,68
1893.....		130.212,27	122.400 »	»	6.510,61
1894.....		129.775,75	122.400 »	»	6.488,79
1895.....		148.970,40	122.400 »	»	7.448,52
1896.....		176.157,37	122.400 »	50.000 »	8.807,87
1897.....		136.030,63	122.400 »	»	6.801,53
1898.....		120.262,47	»	»	6.013,15
		1.622.048,42	1.346.400 »	65.000 »	72.678,22
	Solde mis en réserve pour travaux.		137.970,20	»	»
	Reliquat de 1889.....		»	100.000 »	282.551,85
	Totaux.....	1.622.048,42	1.484.370,20	165.000 »	355.230,07

Les bénéfices totaux, y compris le reliquat de 1889, se sont élevés à 1.622.048,42 *fr.*
Sur cette somme, il a été distribué :

Comme dividende.....	1.346.400,00 *fr.*
Mise en réserve pour les travaux de 1900.....	137.970,20
Porté au fonds de prévoyance.....	65.000,00
Porté à la réserve statutaire.....	72.678,22
Total.....	1.622.048,42

En résumé, à la fin de l'année 1898, la situation financière de la Société était la suivante :

Solde de mise en réserve pour travaux	137.970,20 *fr.*
Fonds de prévoyance.	165.000,00
Réserve statutaire.	355.230,07
Total. . . .	**658.200,27** *fr.*

SIXIÈME PARTIE

APPLICATIONS SCIENTIFIQUES ET DIVERSES

CHAPITRE I

VISIBILITÉ, TÉLÉPHOTOGRAPHIE ET TÉLÉGRAPHIE OPTIQUE

§ 1. — Visibilité.

Du sommet de la Tour se découvre un magnifique panorama qui, sur de nombreux points de l'horizon, s'étend à une distance d'environ 85 *km*.

La vue est limitée par :

Au N.-O. la forêt de Lyons, à l'extrémité de la chaîne de montagnes du Coudray (85 *km*).

Au N. les environs de Clermont (60 *km*).

Au N.-E. la forêt de Compiègne (80 *km*).

A l'E. les environs de Château-Thierry (70 *km*).

Au S.-E. les plateaux de la Brie, vers Provins (80 *km*).

Au S. les plateaux de la forêt de Fontainebleau et ceux voisins d'Étampes (55 *km*).

A l'O. les coteaux de Saint-Cloud et les environs de Vernon (65 *km*).

Il est facile de déterminer la distance théorique à laquelle la rotondité de la Terre permet à la vue de s'étendre.

Soit BF (voir fig. 185) un arc de grand cercle terrestre et AB l'altitude du sommet de Tour. Le rayon visuel, partant du point A, sera tangent à ce cercle au point C.

O étant le centre de la Terre, on a :

$$\overline{AC}^2 = (OB + AB)^2 - \overline{OC}^2.$$

En désignant la distance AC par R, le rayon de la Terre OB,OC par T, et par H l'altitude AB du sommet, on a :

$$R^2 = (T + H)^2 - T^2 = H(2T + H) \qquad \text{d'où} \qquad R = \sqrt{H} \times \sqrt{2T + H}.$$

H étant négligeable, au moins en ce qui concerne la Tour, vis-à-vis de $2T = 12.732.396$ *m*, on peut poser :

$$R = \sqrt{H} \times \sqrt{12.732.396} = 3.570\sqrt{H}.$$

Pour les distances de 100 *km*, où l'angle au centre est moindre que 1°, la distance R et la longueur de l'arc de grand cercle BC sont égales. La distance de visibilité pourra donc pratiquement être calculée par cette formule, quand on ne tient pas compte de la réfraction atmosphérique dont nous étudierons plus loin les effets.

On trouve, en appliquant cette formule aux principaux points de la Tour :

Cote du sommet.	H = 334	$\sqrt{H}$ = 18,27	R = 65.224 *m*
» du 2e étage.	149	12,21	43.590
» du 1er étage.	91	9,54	34.057

En réalité, la vue s'étend plus loin en raison de l'altitude des points de l'horizon, qui dépassent toujours la cote o. Si C est le point de tangence pour le sommet A (voir fig. 185), tous les points dont l'altitude telle que DE les portera sur le prolongement de AC ou au-dessus de cette ligne seront visibles du sommet A.

Cette altitude DE sera donnée par la même formule que précédemment, la distance CD représentant la

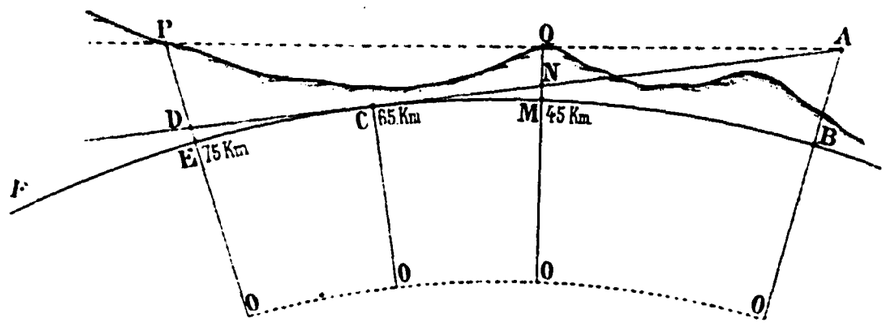


Fig. 185.

distance au delà du point de tangence : pour la distance du point de tangence lui-même, nous la prendrons égale à 65 *km*.

Si les distances totales AD (ou EB mesurée sur le grand cercle) sont de 75 et 85 *km*, les différences CD sont de 10 et de 20 *km*, et on a :

$$10.000 = 3.570\sqrt{H'} \qquad \sqrt{H'} = \frac{10.000}{3.570} = 2,82 \qquad H' = 7,95\ m$$

$$20.000 = 3.570\sqrt{H''} \qquad \sqrt{H''} = \frac{20.000}{3.570} = 5,64 \qquad H'' = 31,81\ m$$

On peut par la même formule chercher à quelle distance les points ayant une altitude de 300 *m* sont visibles.

On a : $$\sqrt{300} = \frac{D}{3.570} \qquad D = 3.570 \times 17,32 = 61.500\ m$$

En y ajoutant la longueur tangentielle. 65.000

La distance totale cherchée est de . . . . . 126.500 *m*

Il y a donc des chances de trouver des points visibles à 125 *km* parmi ceux qui sont à une altitude de 300 *m* et au-dessus.

Inversement, la portée extrême du phare étant de 200 *km*, on peut rechercher quelle serait l'altitude nécessaire pour l'apercevoir.

On a : $$\sqrt{H} = \frac{200.000 - 65.000}{3.570} = \frac{135.000}{3.570} = 37,8 \qquad H = 1.430\ m$$

Aucun point, dans un rayon de 200 *km* de Paris, n'a cette altitude.

Mais, non seulement pour les points situés dans le rayon de 125 *km*, mais même pour ceux situés dans le rayon de 85 *km*, et dont la visibilité correspond à la faible altitude de 32, ce n'est en général pas l'altitude absolue qui règle cette question ; ce sont surtout les obstacles dus aux sommets plus rapprochés qui forment un écran au-dessus duquel le rayon visuel doit passer. Si un point M a une altitude MQ qui dépasse le rayon visuel AC, le nouveau rayon visuel extrême deviendra AQ, qui, prolongé, viendra couper en P la verticale passant par le point E. Pour que ce point soit visible, il faudra donc que l'altitude du point E soit au moins égale à PE.

Il est donc nécessaire, pour déterminer quels sont les points visibles dans chaque direction de l'arc de grand cercle passant par la Tour, de faire un profil en long sur une longueur de 85 à 90 *km* environ, indiquant les différents reliefs du terrain, et de mener les tangentes allant du sommet aux points hauts. On aura ainsi en quelque sorte tous les points dans cette direction éclairés par le phare, les autres restant dans l'ombre. La partie vue sera l'ensemble de tous ces points éclairés qui viendront en apparence se souder les uns aux autres sans discontinuité.

Pratiquement, cette détermination se fait par les procédés géométriques usités pour la télégraphie optique, en tenant compte de la réfraction atmosphérique qui augmente notablement l'étendue de la visibilité. Nous allons décrire sommairement ces procédés d'après deux mémoires du colonel Mangin, que le Service géographique du Ministère de la Guerre a bien voulu nous communiquer.

En vertu de la réfraction atmosphérique, la trajectoire des rayons lumineux n'est pas une ligne droite, mais une ligne courbe dont les tangentes aux deux lieux extrêmes forment avec la droite qui les réunit un angle égal à $\frac{8}{100}$ de l'angle formé au centre de la Terre par les rayons aboutissant à ces points. Chaque extrémité est vue de l'autre suivant la tangente à cette trajectoire et paraît plus élevée qu'elle ne l'est réellement. Les obstacles intermédiaires sont relevés de même, soit de $\frac{8}{100}$ de l'angle au centre qui leur correspond; comme c'est une quantité angulairement moindre, il peut arriver que les deux points donnés s'aperçoivent, bien que la ligne droite qui les joint soit interceptée par un obstacle intermédiaire.

Soit MON (voir fig. *a*) l'arc de grand cercle terrestre compris entre les points A

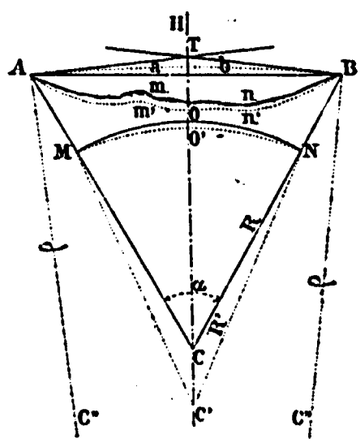


Fig. *a*.

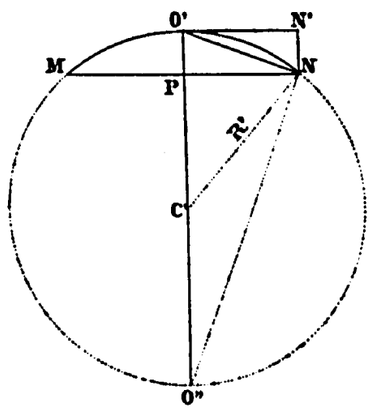


Fig. *b*.

et B, A*mn*B le profil du terrain, A*ab*B la trajectoire courbe du rayon lumineux, à l'extrémité de laquelle les tangentes AT et BT font avec la droite AB un angle égal à $\frac{8}{100}$ de l'angle au centre ACB$=\alpha$; si R est le rayon de la terre, l'arc MON a pour valeur Rα, qui exprime aussi sans erreur sensible la distance AB ainsi que le développement de la trajectoire A*ab*B. On peut considérer cette trajectoire comme un cercle d'un très grand rayon ρ, ayant pour angle au centre le double de $\frac{8}{100}$ de α, soit $0{,}16\alpha$. On a donc $0{,}16\alpha\rho = R\alpha$, d'où $\rho = \frac{R}{0{,}16}$.

Le procédé graphique proposé consiste à substituer à cette trajectoire la droite AB, et à modifier l'arc de grand cercle MON et le profil *Amnb*, de telle sorte qu'en chaque point du terrain AB les flèches comprises entre la droite AB, le profil modifié A*m'n'*B et l'arc de grand cercle modifié MO'N, de rayon R', aient respectivement la même longueur que les flèches comprises entre la trajectoire réelle, le profil vrai et l'arc de grand cercle réel.

La considération des courbures conduit à la relation :

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R} - \frac{1}{\rho} = \frac{1}{R} - \frac{0{,}16}{R} = \frac{0{,}84}{R}$$

d'où :

$$R' = \frac{R}{0{,}84} = \frac{6.366.198}{0{,}84} = 7.578.807\ m.$$

On obtiendra le profil du terrain en comptant les altitudes intermédiaires, non plus à partir de l'arc MON, mais à partir de l'arc MO'N et en portant les longueurs qui les représentent, non suivant les verticales correspondantes, mais suivant des parallèles à la verticale moyenne de la ligne AB, ce qui ne donne lieu qu'à des erreurs négligeables.

Supposons un grand cercle terrestre de rayon R' (voir fig. *b*) agrandi pour tenir compte de la réfraction; soit MO'N, l'arc qui sépare les deux points, dont la corde MN est la distance mesurée sur la carte, abaissons la perpendiculaire C'P'O et menons la tangente O'N'; on peut remplacer sans erreur sensible la demi-corde PN par la corde O'N. En faisant NN'$=h$ et PN$=d$, les triangles rectangles O'NO" et PNO" donnent :

$$\overline{O'N}^2 = O'O'' \times O'P$$

d'où

(1) $\qquad d^2 = 2R'h \qquad$ et $\qquad$ (2) $\qquad h = \frac{d^2}{2R'}$

En remplaçant R' par sa valeur 7.578.807 *m* on a, en prenant le *km* pour unité de la distance *d* et en conservant le mètre pour la hauteur *h*

$$d = 3{,}894\sqrt{h} \qquad \text{et} \qquad h = 0{,}066\,d^2.$$

C'est d'après ces formules que se calculent les tables de visibilité.

A l'altitude de 334 *m* (sommet de la Tour), l'étendue de l'horizon rapportée au niveau de la mer est de 71,167 *km* au lieu de 65,224 *km*, obtenu sans tenir compte de la réfraction, soit plus de 9 p. 100 d'augmentation.

Il est facile de trouver une relation entre l'altitude CO'$=y$ d'un point quelconque C (voir fig. *c*), d'une ligne de visée AB et les altitudes des points extrêmes *h* et H, connaissant la distance *d* du point C au point A, ainsi que D l'écartement des points A et B, et en comptant toutes ces altitudes sur des verticales parallèles à la verticale médiane CO'. Par des similitudes de triangles, on obtient :

$$y - (h - 0{,}066d^2) : H - h - 0{,}066[(D-d)^2 - d^2] :: d : D$$

d'où :

$$y = \frac{Hd + h(D-d)}{D} - 0{,}066(D-d) \qquad (3)$$

Si l'altitude y_1 du terrain en regard du point C est inférieure à la valeur de y

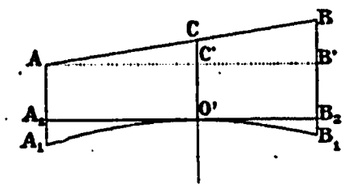


Fig. *c*.

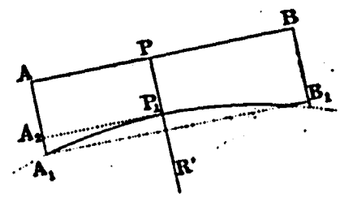


Fig. *d*.

donnée par la relation (3), la visibilité existe, et la différence de $y - y_1$ indique de combien la ligne de visée passe au-dessus du point considéré du terrain; si cette valeur de y_1 est supérieure à y, la visibilité n'existe pas.

Le choix de ce point C se détermine en général par l'inspection de la carte, mais il convient avant tout de chercher le point le plus bas de la ligne de visée, qui est le point le plus critique, et d'examiner sa position par rapport au terrain.

Pour trouver le minimum de y, il faut égaler à zéro sa dérivée par rapport à la variable d, on a ainsi :

$$\frac{H-h}{D} - 0{,}066D + 0{,}132d = 0 \qquad \text{d'où} \qquad d = \frac{D}{2} - \frac{H-h}{0{,}132D}$$

qui peut s'écrire :

(4) $\qquad d = \frac{1}{2}D - 7{,}6\frac{H-h}{D}.$

Soit P ce point dont le pied de la verticale est en P_1, la tangente en ce point est parallèle à la ligne de visée et coupe la verticale de A en un point A_2, tel que $A_2A_1 = 0{,}066\ d^2$. L'altitude du point P sera :

$$PP_1 = AA_2 = AA_1 - A_2A_1 = h - 0{,}066d^2 \qquad (5)$$

Si la formule (4) donne *d* négatif, cela signifie que le point le plus bas tombe en dehors de la ligne AB et la visibilité existe *à priori*, toutes les fois que le terrain ne présente pas de points supérieurs à l'altitude de A. Si la formule (4) donne *d* positif et la formule (5) PP_1 négatif, la visibilité n'existe pas.

Tracé graphique. — L'échelle des reliefs doit être notablement plus grande que celle des longueurs; mais quand on est conduit à un grand rapport d'agrandissement, les déformations, en faisant usage du cercle MO'N, deviennent trop importantes, et il y a nécessité de remplacer le tracé circulaire par un tracé elliptique; il y a même avantage à le faire dans tous les cas, parce que l'on est ainsi complètement maître du rapport d'agrandissement.

Pour déterminer cette ellipse, on peut considérer : 1° que l'on trace sur un plan vertical une épure de visibilité donnant à une même échelle, celle de la carte, les hauteurs et les distances, ainsi que le rayon terrestre agrandi MO'N; 2° que l'on projette cette épure sur un nouveau plan vertical faisant avec le premier un angle α.

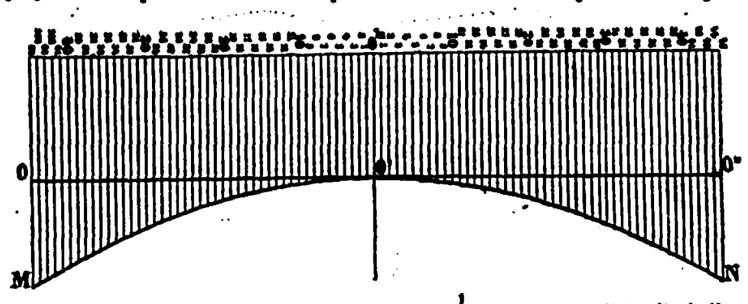


Fig. 186. — Gabari-cherche d'une carte au $\frac{1}{200.000}$ avec un relief à l'échelle de $\frac{1}{2.000}$. Réduction au quart.

Le cercle terrestre deviendra une ellipse, les distances horizontales seront réduites dans le rapport $\frac{1}{n} = \cos\alpha$, les distances verticales resteront les mêmes; 3° que l'on grandisse cette deuxième épure n fois, afin de ramener les distances horizontales à leurs longueurs primitives, celle de la carte, et à maintenir le rapport n existant entre les hauteurs verticales et les horizontales. De cette façon, il n'y aura eu, par rapport à l'épure primitive, aucune déformation anormale.

L'ellipse définitive aura pour petit axe horizontal le diamètre terrestre agrandi pour la réfraction, et pour grand axe vertical ce même diamètre multiplié par le grandissement n choisi pour les verticales.

C'est de cette façon que l'on a tracé un *gabarit-cherche* dont ci-contre la reproduction au $\frac{1}{4}$ (fig. 186).

En opérant sur une carte au $\frac{1}{200.000}$ et en prenant l'échelle des altitudes 100 fois plus grande, soit de $\frac{1}{2.000}$, le tracé de l'ellipse se fera par la formule réduite $y = \frac{a}{2b^2}x^2$ dans laquelle b est le demi-axe horizontal, égal au rayon de la terre 7.578.807 m, réduit à l'échelle de $\frac{1}{200.000}$, soit 37,89 m. Le rapport $\frac{a}{b}$ étant égal à 100, on a $y = \frac{100}{75,78}x^2 = 1,319x^2$, qui pour $x = 45$ km, représenté par 0,225 mm, donne une flèche de 0,067 m. On opère de même pour avoir les points intermédiaires de 10 en 10 km, et on trace les verticales pour chaque km, en numérotant ces distances à partir de la verticale centrale prise comme origine, à droite et à gauche de l'épure.

Pour faire usage de ce gabarit-cherche, on opère comme suit :

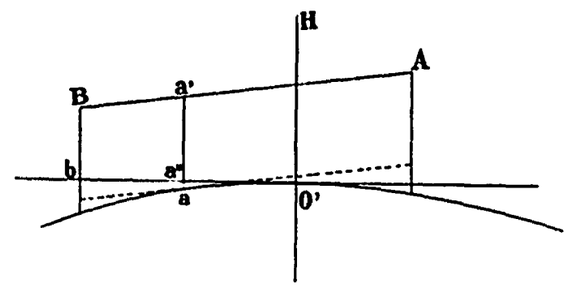


Fig. 187.

1° Unir deux points sur la carte au $\frac{1}{200.000}$;

2° Porter la distance de ces deux points sur la ligne droite OO'O" de manière que son milieu se trouve à peu près sur la verticale O'H;

3° Rapporter sur les verticales des deux points à partir de l'arc terrestre leurs altitudes à l'échelle $\frac{1}{2.000}$;

4° Joindre les deux points ainsi obtenus pour avoir la ligne de visée AB;

5° Déterminer la plus petite distance aa' au moyen de la tangente parallèle à AB, et voir à quel point de la carte elle correspond en mesurant ba'' (voir fig. 187).

6° Rapporter l'altitude de ce point de la carte sur aa' pour voir si le terrain n'intercepte pas AB.

7° Rapporter de même les altitudes des points de terrain dont le relief paraît le plus à craindre, en choisissant convenablement les numéros kilométriques des verticales qui correspondent à la position de ces points par rapport aux points donnés.

L'ensemble de ces points forme un profil, donnant les points visibles, et s'inscrit au crayon sur un gabarit et est ensuite effacé, de manière que le même gabarit serve indéfiniment.

Une première carte au $\frac{1}{320.000}$ a été établie par ces procédés en 1889, par M. A. Bourdon, ingénieur civil; elle s'étendait sur 90 km. Une nouvelle, plus complète au point de vue topographique et à l'échelle de $\frac{1}{200.000}$, a été établie en 1899 par M. Raoul d'Esclaibes-d'Hust, lieutenant-colonel d'artillerie en retraite et directeur du service d'optique de la Tour, en se servant des résultats de la première carte et en outre en faisant la reconnaissance directe à la lunette d'un grand nombre de points. Cette carte, dessinée par M. A. Fortier, est celle dont la réduction au $\frac{1}{400.000}$ figure dans notre album. Elle donne en ocre jaune tous les points visibles, le fond blanc étant conservé pour les parties invisibles.

§ 2. — Téléphotographie.

Des expériences de téléphotographie ont été faites en 1896 de la terrasse de la 3e plate-forme par M. le capitaine du Génie, M. V. Bouttieaux, adjoint au chef du matériel du Génie à Versailles, qui a publié les plus intéressants Mémoires sur la *Téléphotographie en ballon* (*Revue de l'Aéronautique*, 1894).

M. le capitaine Bouttieaux a bien voulu nous remettre quelques-uns de ses clichés, dont deux sont reproduits dans notre Atlas; il y a joint une note sommaire sur ses procédés opératoires que nous donnons ci-dessous, en raison de leur intérêt pratique :

« Ces expériences ont comporté deux séries distinctes :

« 1° Photographies instantanées, exécutées avec des appareils étudiés pour la photographie en ballon (obturateur ayant une vitesse du centième de seconde).

« Les épreuves de Montmartre et de la Concorde donnent des échantillons des résultats obtenus; les

clichés sont extrêmement nets, avec l'objectif de 1 *m* de foyer, et peuvent être agrandis jusqu'à 40 et 50 fois.

« 2° Photographies posées avec des objectifs à long foyer et des téléobjectifs.

« Il est indispensable dans ce cas, pour obtenir le plus de netteté possible, d'employer des plaques orthochromatiques et un écran jaune.

« Les objectifs de 1 *m* de foyer, dans ces conditions, nécessitent une pose de 8 à 10 secondes avec un diaphragme de $\frac{f}{20}$; la netteté peut être conservée avec ce temps de pose, lorsqu'il y a peu de vent. Néanmoins, les clichés ne sont jamais aussi nets que dans la première série, à cause des vibrations de la Tour.

« Lorsqu'il y a du vent, il est impossible de songer à obtenir des photographies posées, les balancements de la Tour donnent du flou aux épreuves.

« Voici pour les objectifs à long foyer.

« Quant aux téléobjectifs à fort grossissement, ils nécessitent des temps de pose atteignant une et deux minutes et leur emploi n'est possible que par vent nul; encore, dans ce cas, le mouvement des ascenseurs apporte-t-il une certaine vibration qui ôte de la netteté aux clichés.

« Il résulte des faits ci-dessus que dans le cas d'un observatoire métallique comme la Tour, il convient pour la photographie à grande distance :

« 1° D'employer les objectifs à long foyer (1 *m* de distance focale) ;

« 2° De faire usage de plaques orthochromatiques avec écran jaune lorsque le vent est faible (épreuves posées) ;

« 3° De faire uniquement de l'instantané dès qu'il y a un vent notable.

« Le 6 octobre 1896, jour de l'arrivée du Czar à Paris, les clichés posés étaient flous, alors que des instantanés sont parfaitement détaillés.

« Comme distances, il est difficile, à moins de temps exceptionnels, de dépasser 4 ou 5 *km*; l'heure la plus favorable est toujours vers la fin de l'après-midi. »

§ 3. — **Télégraphie optique**.

Ce que nous avons dit précédemment sur la visibilité montre, sans qu'il soit besoin d'insister, l'importance que prend la Tour au point de vue de la défense nationale, comme observatoire de télégraphie optique, soit diurne, soit nocturne à l'aide des projecteurs Mangin. Aussi, le service compétent du Ministère de la Guerre a-t-il dû, en prévision de cet emploi, déterminer expérimentalement un certain nombre de points situés sur la périphérie extrême, avec lesquels il y avait possibilité d'échanger des signaux. Bien entendu, ces points parfaitement précisés sont connus de ce service seul. Si ces communications avec des points éloignés avaient existé pendant l'investissement de Paris en 1870, on se rend parfaitement compte quels incalculables services elles auraient rendu à la défense.

Sans entrer dans aucun détail à ce sujet, nous pouvons cependant donner quelques indications au point de vue de la défense du camp retranché de Paris, d'après une note que nous a remise le lieutenant-colonel d'artillerie en retraite, M. d'Esclaibes, auteur de la carte de visibilité que nous avons reproduite.

« Au point de vue des relations avec la province en cas d'investissement, on peut communiquer soit directement, soit par un seul relai judicieusement choisi à l'avance, avec Beauvais, Soissons, Provins, Fontainebleau, Chartres et même Rouen.

« Comme communication des nouveaux forts entre eux et avec Paris, en supposant coupées les lignes télégraphiques ou téléphoniques qui les réunissent, la Tour peut servir de relai commun, sauf à établir au centre de quelques-uns d'entre eux une légère tourelle de hauteur très restreinte.

« La Tour peut donc rendre au point de vue de la télégraphie optique militaire d'inappréciables services et contribuer pour une grande part à assurer la défense du camp retranché de Paris. »

C'est en vue de cette éventualité qu'il a été stipulé, à la convention originelle avec l'État, qu'en cas de guerre, le Ministère de la Guerre prenait immédiatement possession de la Tour et de tous ses organes mécaniques, ainsi que de tous les appareils d'éclairage électrique qui en dépendent.

CHAPITRE II

MÉTÉOROLOGIE

§ 1. — Avant-propos.

La Tour est un observatoire météorologique incomparable, dont le caractère ne tient pas à son altitude absolue, laquelle est seulement de 334 *m*; ce caractère dépend essentiellement de la hauteur au-dessus du terrain de la couche d'air considérée pour laquelle les observations se font à l'air libre, en dehors de l'influence du sol.

Déjà à cette faible hauteur de 300 *m*, les phénomènes de vent et de température sont absolument différents de ceux qui se passent au niveau du sol, sa température propre et son relief communiquent en effet aux couches voisines des variations tout à fait spéciales.

A cette hauteur de 300 *m*, l'amplitude des variations de température ou d'état hygrométrique est bien moindre que près du sol; les vents sont plus réguliers et plus forts, et en somme ce n'est que dans les stations de montagnes élevées que l'on retrouve des résultats analogues à ceux que fournit la Tour.

Aussi, dès l'origine de la construction, en 1889, il a été installé, par les soins et sous la direction de M. E. Mascart, membre de l'Institut et directeur du Bureau central météorologique de France, un service de météorologie extrêmement important.

Les instruments de mesure sont disposés sur la petite plate-forme de 1,60 *m* de diamètre qui termine la Tour à 300 *m* du sol; à l'aide d'un câble, ils transmettent électriquement leurs indications à des appareils enregistreurs situés au rez-de-chaussée du Bureau central, qui est voisin.

Toutes les observations sont relevées heure par heure : pour le vent en vitesse et en direction, pour la température, pour la pression atmosphérique, pour l'état hygrométrique, etc.; elles sont inscrites sur les registres du Bureau et leur résumé figure dans le bulletin publié journellement.

Ces observations sont centralisées par M. Alfred Angot, docteur ès sciences, météorologiste titulaire du Bureau central, qui en a analysé les résultats comparativement aux observations faites dans le local du Bureau central; ils font l'objet de savants Mémoires insérés dans les *Annales* du Bureau. Tous ceux que ces questions intéressent devront les consulter; ils renferment tous les documents détaillés et leur discussion scientifique. Un premier Mémoire concerne les résultats de 1889; cinq autres, ceux des années 1890, 1891, 1892, 1893 et 1894. Enfin, un Mémoire général récapitule les observations de ces cinq années, sauf celles relatives au vent, qui font l'objet d'un Mémoire spécial allant jusqu'en 1895.

Un deuxième Mémoire récapitulatif allant jusqu'en 1899 est en préparation et sera publié en 1900.

Cet ensemble forme un véritable monument scientifique qui fait le plus grand honneur à son auteur.

Les paragraphes qui suivent en sont textuellement extraits; nous en avons omis les parties mathématiques et celles qui, par leur caractère de science trop spéciale, ne rentraient pas dans le cadre de cet ouvrage.

§ 2. — Premières observations des années 1889 et 1890

(Annales du Bureau central météorologique).

I. — Pression atmosphérique.

Les observations de pression atmosphérique ont été faites régulièrement au Bureau météorologique à l'altitude de 33,40 *m*, dans une pièce du rez-de-chaussée, et sur la Tour Eiffel, à l'altitude de 312,90 *m*, dans une des pièces qui sont au-dessus de la troisième plate-forme.

« La différence d'altitude des deux instruments est de 279,5 *m*, et leur distance horizontale d'environ 480 *m*. On a employé dans les deux stations des baromètres enregistreurs Richard à mercure, multipliant par 2 les variations de la pression ; la marche de ces enregistreurs est contrôlée par les observations directes, faites trois fois par jour au Bureau et quatre ou cinq fois par semaine, quelquefois même plus en été, à la Tour Eiffel, avec deux baromètres à mercure à large cuvette, comparés directement l'un à l'autre. Toutes les observations ont été réduites à zéro et corrigées de l'erreur instrumentale; les hauteurs réduites au niveau de la mer sont, de plus, ramenées à la gravité normale, c'est-à-dire exprimées en colonnes de mercure dont la densité est évaluée au niveau de la mer et à la latitude de 45 degrés. »

Variations diurnes et annuelles de la pression. — Nous n'entrerons pas dans le détail de ces variations qui comporte une analyse très délicate sur des chiffres ne différant entre eux que de centièmes de millimètre et qui a été longuement et savamment étudiée dans les mémoires de M. Angot. Nous donnerons seulement ses conclusions.

La variation diurne, par la distribution horaire de ses maxima et de ses minima, est très différente à 300 *m* de hauteur de ce qu'elle est près du sol ; elle se rapproche beaucoup de ce que l'on observe au sommet des montagnes. Les premiers résultats de 1889 ont été d'ailleurs nettement confirmés par les observations des cinq années suivantes.

Quant à la variation annuelle, la pression moyenne pendant les six mois de 1889 a été, pour le Bureau météorologique, de 760,67 *mm*, et pour la Tour de 735,58 *mm*. Ces pressions ramenées au niveau de la mer ont donné pour le Bureau météorologique 763,73 *mm* et pour la Tour 763,64 *mm*. Dans les cinq années qui ont suivi, les moyennes des pressions vraies ont été : pour le Bureau, de 759,38 *mm*, et de 734,15 *mm* pour la Tour. Les moyennes des pressions réduites sont de : pour le Bureau 762,69 *mm*, et pour la Tour de 762,57 *mm*.

La conclusion est que la pression observée au sommet de la Tour est trop basse par rapport à celle du Bureau, non seulement comme moyenne, mais encore dans tous les mois (1). Cette différence ne peut en aucune manière être attribuée aux instruments et correspond à un fait réel. L'explication de cet excès de pression, dans le voisinage immédiat du sol, est, d'après M. Angot, qu'en raison des grandes vitesses des vents à 300 *m* par rapport au sol, il existerait dans cette région un matelas d'air retenu par le frottement et qui se trouve comprimé entre le sol et les couches supérieures, animées d'une plus grande vitesse et plus libres dans leurs mouvements.

« *Variations accidentelles du baromètre.* — D'une manière générale, les mouvements du baromètre se produisent d'une façon exactement semblable, à l'amplitude près, au sommet de la Tour Eiffel et au Bureau météorologique; les plus petits accidents se retrouvent de la même manière sur les courbes des deux enregistreurs. Les pressions ramenées au même niveau ne diffèrent que de quelques dixièmes de millimètre et d'un millimètre au plus dans les cas extrêmes, tel que le suivant :

« Au mois de novembre 1889, du 7 au 23, une aire de hautes pressions, venue par le golfe de Gascogne, s'est étendue sur la France et l'Europe centrale; elle a disparu vers le sud-est de la Russie le 25, tandis que les basses pressions gagnaient le nord-ouest de l'Europe depuis le 24; une bourrasque très importante (735 *mm*) avait son centre le 25 au matin au sud-ouest de la Norvège et faisait baisser le baromètre à Paris

(1) 1890-1894. — *Pression moyenne au Bureau météorologique et à la Tour Eiffel.*

	Pressions vraies.		Pressions réduites.	
	Bureau.	Tour.	Bureau.	Tour.
	mm.	*mm.*	*mm.*	*mm.*
Janvier	760,65	734,61	764,07	763,93
Février	61,61	35,75	65,00	64,89
Mars	58,78	33,21	62,12	61,98
Avril	57,59	32,15	60,88	60,76
Mai	57,25	32,38	60,51	60,41
Juin	59,98	35,26	63,17	63,07
Juillet	58,60	34,08	61,83	61,72
Août	58,94	34,43	62,16	62,06
Septembre	60,88	36,13	64,15	64,08
Octobre	57,88	32,70	61,19	61,09
Novembre	59,22	33,62	62,57	62,41
Décembre	61,23	35,13	64,63	64,45
Année	59,38	34,15	62,69	62,57

jusqu'à 752,8 *mm*. Vers la fin de cette période, le 21, tandis que le vent était nul ou faible du S.-E. au niveau du sol, il a commencé à souffler au sommet de la Tour Eiffel du S.-S.-O. à partir de 6 heures du soir, et il s'est produit entre le sommet et la base une inversion de température remarquable qui a duré plus de deux jours, jusqu'au 24 à 7 heures du matin, et sur laquelle nous reviendrons plus tard. Pendant ce temps, la comparaison des pressions observées réellement au sommet de la Tour avec celles que l'on peut calculer par la formule de Laplace, en partant des observations du Bureau, a donné les résultats suivants :

« Le 20 et le 21 novembre, la pression vraie de la Tour était un peu plus faible (de —0,1 *mm* à —0,2 *mm*) que la pression calculée; la différence s'accentue au moment de l'inversion de température et atteint —0,4 *mm* en moyenne dans la nuit du 21 au 22. A partir du soir du 22, jusqu'au soir du 23, alors que le baromètre commence à baisser lentement, la pression vraie de la Tour devient plus grande que la pression calculée ; la différence est de + 0,2 *mm* en moyenne. Le 24, au contraire, à partir de 9 heures du matin, au moment où le baromètre se met à baisser rapidement, la pression vraie de la Tour est beaucoup plus faible que la pression calculée; la différence augmente progressivement et atteint —1 *mm* en moyenne le 25 entre 1 heure et 6 heures du matin, au moment de la plus grande vitesse de la baisse du baromètre. La différence s'atténue au moment du minimum et change de signe dès que le baromètre remonte; l'écart moyen est de 0,7 *mm* entre midi et 6 heures du soir, alors que la hausse du baromètre est la plus rapide; il devient seulement + 0,4 *mm* à partir de 8 heures du soir. »

II. — Température de l'air.

1° *Installation des instruments.* — Une série d'observations de la température a été faite au Bureau central dans la cour à l'altitude de 31,6 et à 1,60 du sol, dans un abri en fer à double toit, analogue à celui qui est en usage dans toutes les stations françaises.

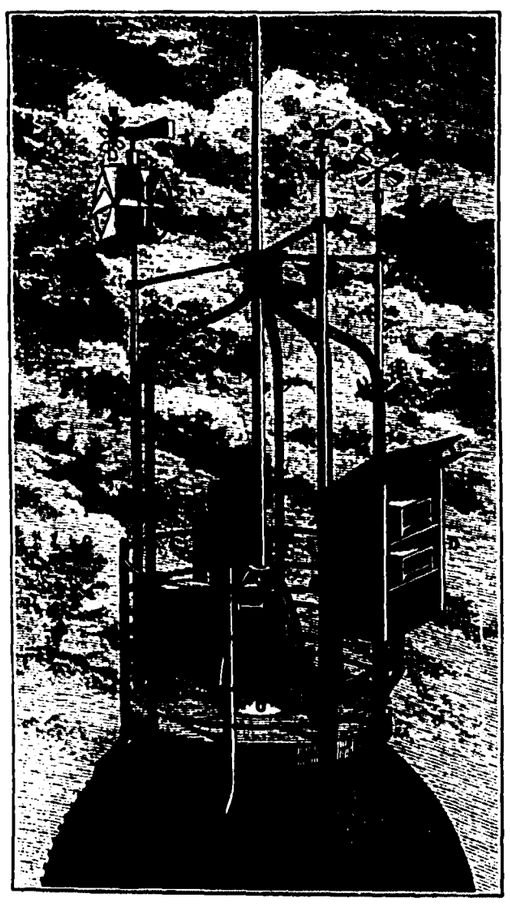


Fig. 188.

« A la Tour Eiffel, les thermomètres sont placés à l'altitude de 335,3 *m* au-dessus de la mer et à 301,8 *m* du sol, sous un abri à double toit, accroché, du côté nord, en dehors de la balustrade de la plate-forme du paratonnerre. L'abri, comme celui de la terrasse du Bureau central, est entièrement ouvert au nord et par-dessous (voir D, fig. 188) (1). Il est fermé à l'est, au sud et à l'ouest par deux séries de persiennes inclinées en sens inverse et distantes intérieurement de 5 *cm* environ. Le vent étant beaucoup plus fort à cette hauteur que près du sol, les petites causes d'erreur introduites par l'abri deviennent négligeables, et les observations de température peuvent être considérées comme faites dans d'excellentes conditions. Sous cet abri sont placés un psychromètre, un thermomètre à maxima, un thermomètre à minima, un thermomètre et un hygromètre enregistreurs Richard ; on y a ajouté un thermomètre transmetteur électrique, de l'invention de MM. Richard frères, qui donne au Bureau central météorologique la marche continue de la température au sommet de la Tour Eiffel.

« En plus de ces instruments, on a installé à la Tour Eiffel deux autres séries de thermomètres à lecture directe et enregistreurs, l'une à la plate-forme intermédiaire (230,2 *m* au-dessus de la mer, 196,7 *m* au-dessus du sol); l'autre à la deuxième plate-forme (156,6 *m* au-dessus de la mer, et 123,1 *m* au-dessus du sol).

« 2° *Variation diurne de la température.* — Dans le tableau suivant, nous donnons, pour le Bureau central météorologique (cour) et pour la Tour Eiffel, les moyennes horaires de la température dans tous les mois d'observation.

(1) L'abri est en réalité beaucoup plus large qu'il n'a été indiqué sur la figure; il a 1 *m* de largeur et contient sur une même rangée un psychromètre, le thermomètre enregistreur et les thermomètres à maxima et à minima; sur la rangée inférieure sont l'hygromètre enregistreur et le thermomètre transmetteur; la face nord, ainsi que la face inférieure, sont garnies d'un grillage métallique à mailles très larges.

1889. — *Moyennes horaires de la température au Bureau météorologique* (cour).							1889. — *Moyennes horaires de la température à la Tour Eiffel* (sommet).						1889. — *Différence entre le Bureau central météorologique et la Tour.*					
HEURES.	JUILLET.	AOUT.	SEPT.	OCT.	NOV.	DÉC.	JUILLET.	AOUT.	SEPT.	OCT.	NOV.	DÉC.	JUILLET.	AOUT.	SEPT.	OCT.	NOV.	DÉC.
0 (Minuit)...	16,67	15,53	13,42	9,33	6,31	0,87	15,04	14,47	13,11	8,51	6,25	—0,89	1,63	1,06	0,31	0,82	0,06	1,76
1.....	16,10	15,16	13,01	9,00	5,84	0,85	14,50	14,19	12,84	8,23	6,35	—0,85	1,60	0,97	0,17	0,77	—0,51	1,70
2.....	15,75	14,84	12,62	8,84	5,58	0,74	14,28	14,00	12,59	8,02	6,30	—0,86	1,47	0,84	0,03	0,82	—0,72	1,60
3.....	15,30	14,58	12,26	8,76	5,48	0,68	14,01	13,77	12,26	7,92	6,23	—0,91	1,26	0,81	0,00	0,84	—0,75	1,59
4.....	15,04	14,19	11,97	8,65	5,44	0,66	13,55	13,41	11,85	7,60	5,95	—1,09	1,49	0,78	0,12	1,05	—0,51	1,75
5.....	14,95	13,94	11,63	8,50	5,33	0,65	13,54	13,20	11,66	7,47	5,81	—1,10	1,41	0,74	—0,03	1,03	—0,48	1,75
6.....	15,37	14,28	11,56	8,46	5,15	0,58	13,72	13,45	11,61	7,30	5,61	—1,19	1,65	0,83	—0,05	1,16	—0,46	1,77
7.....	16,55	15,40	12,03	8,61	5,09	0,54	13,85	13,81	11,73	7,53	5,51	—1,32	2,70	1,59	0,30	1,08	—0,42	1,86
8.....	17,93	17,10	13,38	9,16	5,36	0,61	14,43	14,67	11,83	7,62	5,61	—1,35	3,50	2,43	1,55	1,54	—0,25	1,96
9.....	19,15	18,46	14,87	10,08	6,01	0,72	15,25	15,27	12,36	8,08	5,85	—1,05	3,90	3,19	2,51	2,00	0,16	1,77
10.....	20,03	19,66	16,39	11,17	7,05	1,18	16,32	16,24	12,83	8,56	6,05	—0,66	3,71	3,42	3,56	2,61	1,00	1,84
11.....	21,17	20,68	17,58	12,11	7,77	1,53	17,11	17,00	13,72	8,95	6,42	—0,50	4,06	3,68	3,86	3,16	1,35	2,03
12 (Midi)....	21,81	21,61	18,52	13,14	8,46	2,05	17,62	17,49	14,45	9,86	6,65	—0,35	4,19	4,12	4,07	3,28	1,81	2,40
13.....	22,17	21,45	19,10	13,65	8,98	2,37	18,28	17,65	15,10	10,08	6,92	—0,13	3,89	3,80	4,00	3,57	2,06	2,50
14.....	22,56	21,85	19,35	13,92	9,08	2,48	18,51	18,05	15,44	10,32	6,86	—0,10	4,02	3,80	3,91	3,60	2,22	2,58
15.....	22,51	22,05	19,40	13,72	8,87	2,35	18,72	18,25	15,69	10,50	6,69	—0,18	3,79	3,80	3,71	3,22	2,18	2,53
16.....	22,59	22,00	18,90	13,24	8,17	2,11	18,72	18,23	15,55	10,01	6,42	—0,31	3,87	3,77	3,35	3,23	1,75	2,42
17.....	22,24	21,21	18,12	12,33	7,75	1,97	18,70	18,00	15,38	9,67	6,33	—0,29	3,54	3,21	2,74	2,66	1,42	2,26
18.....	21,56	20,19	16,99	11,40	7,39	1,85	18,54	17,46	14,94	9,52	6,20	—0,28	3,02	2,73	2,05	1,88	1,19	2,13
19.....	20,75	18,99	15,92	10,83	7,21	167	17,97	16,77	14,59	9,50	6,27	—0,28	2,78	2,22	1,33	1,33	0,94	1,95
20.....	19,55	17,99	15,35	10,53	6,88	1,51	17,18	16,23	14,33	9,28	6,31	—0,45	2,37	1,76	1,02	1,25	0,57	1,96
21.....	18,76	17,29	14,76	10,17	6,74	1,37	16,76	15,75	13,75	9,02	6,29	—0,74	2,00	1,54	1,01	1,15	0,45	2,11
22.....	18,11	16,64	14,25	9,78	6,43	1,17	16,47	15,32	13,50	8,86	6,17	—0,86	1,64	1,32	0,75	0,92	0,26	2,03
23.....	17,48	16,02	13,72	9,41	6,32	1,06	15,80	14,91	13,09	8,84	6,15	—0,94	1,68	1,11	0,63	0,60	0,17	2,00
24 (Minuit...	16,79	15,48	13,14	9,24	6,12	0,85	15,28	14,46	12,64	8,55	5,89	—0,94	1,51	1,02	0,50	0,69	0,23	1,79

« Il est intéressant de comparer les variations diurnes indiquées par le tableau précédent avec celle du parc Saint-Maur, qui représente la variation normale pour la région de Paris. Nous donnons ici le résultat de cette comparaison. Pour ne pas allonger inutilement, nous nous bornons à reproduire les différences moyennes horaires entre le Bureau (cour) et Saint-Maur, pour les six mois de juillet à décembre; enfin, nous donnons pour chaque mois les différences horaires entre Saint-Maur et la Tour Eiffel.

Différences horaires de température.

Heures.	B. C. M. (cour) — Saint-Maur.	Saint-Maur-Tour Eiffel.					
	Juillet-Décembre.	Juillet.	Août.	Septembre.	Octobre.	Novembre.	Décembre.
0 (Minuit).....	1,03	—0,01	—0,62	—2,01	—0,89	—1,43	+0,82
1.....	1,54	+0,10	—0,58	—2,23	—0,65	—1,87	0,68
2.....	»	»	»	»	»	»	»
3.....	»	»	»	»	»	»	»
4.....	1,01	—0,07	—1,03	—1,92	—0,33	—2,15	0,51
5.....	1,50	0,00	—1,04	—1,84	+0,17	—2,04	0,49
6.....	1,31	+0,62	—0,59	—1,82	—0,01	—1,91	0,59
7.....	1,09	1,98	+0,74	—0,97	+0,04	—1,82	0,63
8.....	0,90	2,83	1,71	+0,97	0,72	—1,54	0,64
9.....	0,50	3,60	2,85	2,48	1,60	—0,62	0,65
10.....	0,41	3,74	2,88	3,47	2,24	+0,47	0,87
11.....	0,44	3,54	3,16	3,45	2,85	1,14	1,38
12 (Midi).....	0,49	3,91	3,28	3,53	2,92	1,62	1,69
13.....	0,48	3,50	3,43	3,24	3,03	2,01	1,75
14.....	0,51	3,31	3,37	3,28	3,14	2,19	1,77
15.....	0,69	3,13	3,08	2,63	2,50	2,04	1,71
16.....	0,89	2,96	2,46	2,26	2,30	1,63	1,46
17.....	1,05	2,48	2,33	1,53	1,32	0,80	1,06
18.....	1,20	2,01	1,65	0,37	0,45	0,47	0,88
19.....	1,39	1,41	0,89	—0,78	—0,20	—0,01	0,83
20.....	1,54	0,74	0,31	—1,37	—0,30	—0,55	0,83
21.....	1,57	0,13	—0,01	—1,43	—0,59	—0,52	0,99
22.....	1,64	—0,29	—0,27	—1,65	—0,83	—0,85	0,98
23.....	1,65	—0,03	—0,57	—1,92	—1,08	—1,11	0,99
24 (Minuit).....	1,64	—0,16	—0,70	—1,84	—1,08	—1,19	0,87

« Les différences horaires entre le Bureau météorologique et Saint-Maur sont positives; la température est donc plus élevée dans l'intérieur de la ville, au Bureau, qu'à la campagne, comme on le savait depuis longtemps; mais il est intéressant d'étudier la marche horaire de ces différences, qui sont loin d'être constantes.

« L'excès de température de la ville sur la campagne est relativement faible au milieu du jour (0°,4 environ), mais considérable pendant la nuit, où il atteint et dépasse 1°,6. L'influence de la ville, en même temps

qu'elle élève la température moyenne, modifie complètement la forme de la variation diurne et en diminue l'amplitude. Ces comparaisons, qui seront continuées, sont intéressantes en ce qu'elles permettront d'évaluer avec plus de détail qu'on ne l'a fait d'ordinaire la grandeur et la nature des erreurs auxquelles sont sujettes les observations météorologiques faites dans les villes.

« Comme les observations de la Tour Eiffel se trouvent, grâce à l'altitude même de la station et à la force du vent qui y règne, soustraites aux influences perturbatrices de la ville, nous les avons comparées non à celles du Bureau météorologique, mais à celles de Saint-Maur qui donnent les valeurs normales correspondant au climat de Paris. La différence d'altitude des thermomètres dans les deux stations est de 285 *m*, ce qui, en admettant une décroissance moyenne de 1° pour 180 *m*, devrait donner entre elles une différence normale de température de 1°,58.

« Non seulement la température au sommet de la Tour pendant la nuit diffère constamment de celle de Saint-Maur de moins que 1°,58, mais, même pendant cinq mois sur six (décembre 1889 fait seul exception), la température est plus élevée en valeur absolue au sommet de la Tour qu'à Saint-Maur, et il y a inversion de température entre le sol et 300 *m* de hauteur. Pendant le jour, au contraire, la différence de température est beaucoup plus grande entre les deux stations que la valeur normale 1°,58.

« Ces différences s'expliquent aisément par le rôle que joue le sol dans la variation diurne de la température. L'air, qui a un très faible pouvoir absorbant, s'échauffe peu directement pendant le jour, et de même se refroidit peu pendant la nuit. A une certaine hauteur dans l'air libre, l'amplitude de la variation diurne doit donc être très faible; elle n'est grande dans les couches inférieures que parce que celles-ci s'échauffent et se refroidissent au contact du sol. Pendant les cinq mois de juillet à novembre inclus, l'amplitude de la variation diurne au sommet de la Tour a été moindre que 4°,5 en moyenne qu'au Parc Saint-Maur. Sur les montagnes, les mêmes effets se produisent, mais d'une manière proportionnellement moins marquée qu'à la Tour Eiffel, car la masse de la montagne joue encore un certain rôle et produit au sommet une variation diurne beaucoup plus grande que celle que l'on devrait observer normalement à la même hauteur dans l'air libre.

« Le phénomène d'inversion des températures avec la hauteur est en quelque sorte normal dans les nuits claires et calmes. C'est seulement quand le froid est amené par un vent d'est de vitesse notable que la température est plus basse pendant la nuit au sommet de la Tour Eiffel que près du sol.

« Une conséquence intéressante de cette différence dans les variations diurnes est qu'à une certaine hauteur la température moyenne doit être relativement plus élevée que près du sol. Pendant le jour, en effet, les courants ascendants rendent plus rapide la décroissance verticale des températures qui se rapproche de la détente adiabatique; pendant la nuit, au contraire, les couches inférieures se refroidissent beaucoup, et, quand l'air est calme, ce refroidissement ne se communique pas sensiblement aux couches plus hautes. Ce dernier effet est beaucoup plus grand que l'action inverse pendant le jour, les couches supérieures doivent donc présenter, en moyenne, une température plus élevée que celle que l'on calculerait en partant de la température des couches voisines du sol et en tenant compte de la décroissance normale. Cet excès moyen de température des couches élevées provient ainsi de ce fait que le refroidissement nocturne est relativement moins grand en haut que ne l'est le réchauffement diurne.

« 3° *Variation annuelle de la température.* — Nous donnons dans le tableau suivant les moyennes mensuelles de la température obtenues en 1889, au Bureau météorologique (cour), au sommet de la Tour Eiffel et au Parc Saint-Maur. Ces nombres sont les moyennes des vingt-quatre heures.

Moyennes mensuelles de la température en 1889.

				Différences avec Saint-Maur.	
	Parc Saint-Maur.	Bureau météorologique (cour).	Tour Eiffel.	Bureau météorologique (cour).	Tour Eiffel.
Juillet	17°,84	18°,92	16°,22	+1°,08	—1°,62
Août	16,80	17,96	15,73	1,16	—1,07
Septembre	13,70	15,21	13,50	1,51	—0,20
Octobre	9,51	10,62	8,80	1,11	—0,71
Novembre	5,86	6,77	6,21	0,91	+0,35
Décembre	0,27	1,31	—0,70	1,04	—0,97
Moyenne	10,66	11,79	9,99	1,13	—0,67

« L'altitude des thermomètres à Saint-Maur (50 *m*) et sur la terrasse du Bureau central (53 *m*) est sensible-

ment la même; les nombres sont donc directement comparables. La moyenne du Bureau, dans l'intérieur de Paris, est exactement de 1°,13 plus élevée qu'à la campagne ; mais la différence est loin d'être constante dans tous les mois.

« La durée des observations sur la Tour Eiffel est encore trop courte pour qu'on puisse en déduire des conclusions intéressantes sur la décroissance moyenne de la température avec la hauteur. On voit toutefois que, sauf en juillet, la différence avec Saint-Maur a été constamment plus petite que la valeur 1°,58 qui correspondrait à une décroissance de 1° pour 180 *m*; cela tient surtout aux inversions très fréquentes de température qui se présentent pendant la nuit et dont l'effet, comme nous l'avons indiqué à propos de la variation diurne, est de donner à une certaine distance du sol une température moyenne relativement plus élevée que dans les couches les plus basses.

« Un seul mois, celui de novembre, a donné une température absolue plus haute sur la Tour Eiffel qu'à Saint-Maur ; cette anomalie tient uniquement à une période d'inversion remarquable, qui a duré du 21 au 24 novembre, et pendant laquelle la température à 300 *m* de hauteur a été constamment beaucoup plus haute que près du sol (la différence a même atteint 12°,8 le 22, à 5 heures du matin); nous reviendrons plus loin sur cette période. Si l'on retranche de novembre les trois jours compris du 21 à midi au 24 à midi, on trouve, comme température moyenne des vingt-sept jours qui restent, 6°,24 à Saint-Maur et 5°,97 à la Tour Eiffel, ce qui fait disparaître l'anomalie indiquée.

« 4° *Variations irrégulières de la température.* — Les variations irrégulières de la température se produisent sensiblement de la même manière au Bureau météorologique et au Parc Saint-Maur, malgré la distance; mais il n'en est plus de même à la Tour Eiffel. Très fréquemment les courbes des enregistreurs de la Tour et du

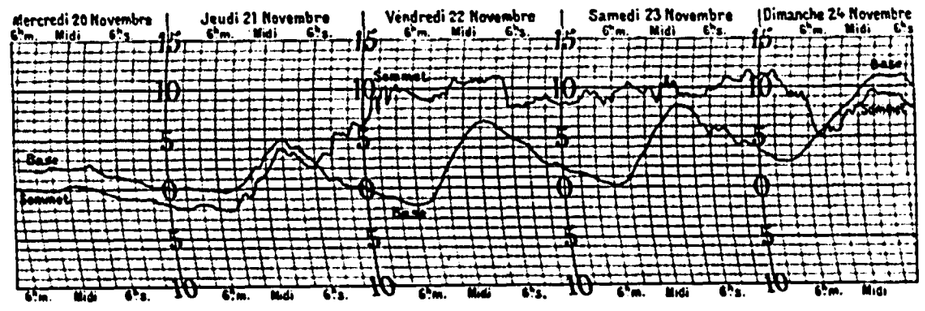


Fig. 189.

Bureau ne présentent aucune analogie; d'une manière générale, celles de la Tour sont moins régulières : en même temps que l'oscillation diurne diminue d'importance, les perturbations accidentelles sont beaucoup plus marquées, et souvent même il s'en manifeste de considérables, qui restent absolument inaperçues en bas. Les observations de la Tour Eiffel sont particulièrement intéressantes en ce qu'elles montrent que les conditions générales de l'atmosphère à une très faible hauteur peuvent différer entièrement de ce que l'on observe près du sol, où les influences perturbatrices de toutes sortes ralentissent et même suppriment complètement un grand nombre de mouvements.

« Un des exemples les plus remarquables sous ce rapport a été fourni par la période comprise entre le 21 et le 24 novembre. A la Tour Eiffel, la température était comme d'ordinaire plus basse que près du sol le 21 pendant toute la journée; le vent était faible de l'Est-Nord-Est avec une vitesse variable de 2 *m* à 4 *m* par seconde, lorsque, à partir de 6 heures du soir, le vent commence à incliner progressivement vers le Sud; il est Sud-Est plein à 7 heures du soir, Sud à 10 heures, et à partir de minuit 30 minutes se fixe à Sud-Sud-Ouest; il oscille ensuite seulement entre Sud et Sud-Ouest jusqu'au 24 avec une vitesse comprise entre 5 *m* et 10 *m*, tandis qu'en bas l'air était presque constamment calme ou qu'on ne ressentait qu'un vent très faible d'entre Sud et Sud-Est, dont la plus grande vitesse n'a pas dépassé 2 *m*. En même temps, la température à la Tour, au lieu de baisser dans la soirée du 21, remonte brusquement à partir de 6 heures du soir et augmente de 7°,3 entre 6 heures du soir et 2 heures du matin. Depuis ce moment jusqu'au 24 à 7 heures du matin, où une dépression profonde arrive par le nord des Iles Britanniques et amène au niveau du sol à Paris le régime des vents de Sud-Ouest, la température est restée constamment plus haute sur la Tour Eiffel qu'à la base,

comme on le voit sur la figure 189, qui est une réduction exacte des courbes des thermomètres enregistreurs installés au sommet de la Tour Eiffel et à la base (pilier Est). Il y a donc eu à 300 *m* de hauteur seulement un changement complet de régime qui a mis plus de deux jours à se faire sentir jusqu'au sol. Ce qu'il y a de plus remarquable, c'est que rien ne pouvait faire prévoir d'en bas ces conditions ; depuis le soir du 21 jusqu'au matin du 24, le ciel a été constamment d'une pureté parfaite.

« En raison de l'intérêt que présente cette période, nous donnons ici le détail des observations horaires de la température à la Tour Eiffel et au Parc Saint-Maur pendant la durée de l'inversion, du 21 à 4 heures du soir jusqu'au 24 à 9 heures du matin.

Températures à Saint-Maur et à la Tour Eiffel du 21 au 24 novembre 1889.

	h	Saint-Maur.	Tour.	Différences.		h	Saint-Maur.	Tour.	Différences.		h	Saint-Maur.	Tour.	Différences.
21 nov.	16.	4,1	3,1	— 1,0	22 nov.	14.	7,2	10,7	+ 3,5	23 nov. (Midi)	12.	7,0	10,0	+3,0
	17.	2,2	2,7	+ 0,5		15.	7,1	10,9	+ 3,8		13.	8,9	10,0	+1,1
	18.	1,1	2,9	+ 1,8		16.	5,9	11,2	+ 5,3		14.	9,2	9,7	+0,5
	19.	0,2	3,3	+ 3,1		17.	4,9	11,0	+ 6,1		15.	9,2	9,0	—0,2
	20.	—0,6	3,8	+ 4,4		18.	4,3	8,0	+ 3,7		16.	7,9	8,5	+0,6
	21.	—1,0	5,7	+ 6,7		19.	2,7	8,1	+ 5,4		17.	6,1	8,9	+2,8
	22.	—1,6	5,0	+ 6,6		20.	2,0	8,7	+ 6,7		18.	4,5	9,4	+4,9
	23.	—1,9	6,5	+ 8,4		21.	1,8	8,9	+ 7,1		19.	4,0	10,0	+6,0
22 nov. (Min.)	0.	—2,1	6,1	+ 8,2		22.	0,8	9,0	+ 8,2		20.	3,1	10,9	+7,8
	1.	—2,2	9,3	+11,5		23.	0,2	9,0	+ 8,8		21.	5,0	10,6	+5,6
	2.	»	10,0	»	23 nov. (Min.)	0.	0,0	8,7	+ 8,7		22.	3,9	10,2	+6,3
	3.	»	9,7	»		1.	—0,7	8,3	+ 9,0		23.	3,6	11,2	+7,6
	4.	—2,9	9,7	+12,6		2.	»	8,9	»	24 nov. (Min.)	0.	3,7	10,9	+7,2
	5.	—3,0	9,8	+12,8		3.	»	9,6	»		1.	3,7	11,5	+7,8
	6.	—2,9	9,3	+12,2		4.	—1,0	9,1	+10,1		2.	»	11,1	»
	7.	—2,9	8,7	+11,6		5.	—1,1	9,0	+10,1		3.	»	10,0	»
	8.	—2,0	8,6	+10,6		6.	—0,9	8,9	+ 9,8		4.	1,7	9,0	+7,3
	9.	—0,5	9,2	+ 9,7		7.	—0,7	9,8	+10,5		5.	1,3	8,9	+7,6
	10.	1,8	9,4	+ 7,6		8.	—0,5	10,4	+10,9		6.	1,5	8,4	+6,9
	11.	3,9	10,8	+ 6,9		9.	1,5	9,0	+ 7,5		7.	2,9	5,1	+2,2
	(Midi) 12.	5,2	10,3	+ 5,1		10.	4,0	9,3	+ 5,3		8.	3,4	5,1	+1,7
	13.	6,6	10,7	+ 4,1		11.	5,9	8,0	+ 2,1		9.	5,6	5,1	—0,5

« Ces différences de température sont d'autant plus remarquables que la variation diurne de la température a été très grande au Parc Saint-Maur le 22 et le 23 à cause de la pureté du ciel; malgré ces conditions défavorables, l'inversion de température a persisté même pendant la journée.

III. — Humidité atmosphérique.

« 1° *Installation des appareils.* — L'humidité atmosphérique est enregistrée au sommet de la Tour Eiffel, depuis le 10 juillet 1889, au moyen d'un hygromètre à cheveu de MM. Richard frères, installé à côté des thermomètres, à 301,8 *m* au-dessus du niveau du sol et 335,3 *m* au-dessus du niveau de la mer. Cet instrument est contrôlé par les observations directes effectuées au psychromètre aussi souvent que cela est possible.

« 2° *Variation diurne de l'humidité relative.* — Le tableau suivant contient, pour les six derniers mois de l'année 1889, les moyennes horaires de l'humidité relative à la Tour Eiffel; nous ajoutons comme terme de comparaison la valeur correspondante pour le Parc Saint-Maur. Les observations n'ayant commencé à la Tour que dans l'après-midi du 9 juillet, les moyennes de ce mois ne comprennent que 22 jours seulement, du 10 au 31. Enfin les moyennes de décembre ne comprennent également que 22 jours, l'enregistreur ayant été arrêté du 15 au 10 inclus et du 27 à la fin du mois.

Variation diurne de l'humidité relative à la Tour Eiffel et au Parc Saint-Maur.

	Tour Eiffel.						Parc Saint-Maur.					
Heures.	Juillet.	Août.	Septembre.	Octobre.	Novembre.	Décembre.	Juillet.	Août.	Septembre.	Octobre.	Novembre.	Décembre.
0 (Minuit).....	70,6	77,1	68,8	78,5	80,2	81,8	85,3	87,9	89,3	93,7	93,4	92,3
1.....	71,5	78,1	69,9	81,1	78,8	81,6	87,4	88,4	91,7	93,8	93,9	91,2
2.....	73,0	80,8	70,9	82,5	78,8	82,5	»	»	»	»	»	»
3.....	74,6	81,7	75,0	84,2	82,5	82,0	»	»	»	»	»	»
4.....	77,0	85,1	75,9	85,8	82,7	84,3	91,2	92,4	93,6	93,5	94,5	94,3
5.....	76,5	83,5	75,3	85,1	81,9	81,4	91,5	92,4	94,0	93,4	94,2	94,9
6.....	76,0	84,8	75,5	86,2	82,5	85,9	88,1	90,4	93,5	93,8	94,5	93,4

Heures.	Tour Eiffel. Juillet.	Août.	Septembre.	Octobre.	Novembre.	Décembre.	Parc Saint-Maur. Juillet.	Août.	Septembre.	Octobre.	Novembre.	Décembre.
7	73,5	83,0	74,3	84,8	82,3	87,9	82,4	85,5	89,2	93,9	94,0	93,9
8	71,6	78,8	74,7	85,8	83,3	88,4	76,4	77,6	81,6	92,2	93,7	93,6
9	69,3	71,5	70,5	83,6	83,9	87,6	68,6	69,4	73,6	86,6	89,9	91,9
10	67,6	66,7	67,5	81,0	84,5	87,2	62,9	63,4	66,0	82,7	85,3	89,8
11	65,0	62,5	62,9	77,3	82,1	87,9	59,1	59,7	60,6	77,7	82,3	86,4
12 (Midi)	62,7	59,3	60,3	73,3	79,8	87,1	56,1	55,9	56,4	72,8	78,0	84,5
13	62,6	59,3	55,8	68,6	78,6	85,3	54,5	54,4	54,2	69,7	75,4	84,7
14	59,7	58,4	55,0	66,8	80,2	85,4	53,8	55,5	52,3	66,8	74,1	83,8
15	60,4	57,7	54,4	69,5	81,8	84,6	53,6	53,4	54,1	69,4	75,9	84,3
16	59,1	57,4	56,1	71,5	83,6	84,9	55,4	57,0	56,5	72,9	79,4	85,9
17	57,6	59,2	57,3	73,4	82,7	85,5	56,3	58,7	61,2	81,1	85,5	88,7
18	58,9	62,1	58,4	72,0	83,5	84,1	58,6	65,1	68,6	85,4	87,1	88,5
19	59,6	64,4	59,8	72,1	82,4	83,1	64,3	74,1	77,4	88,7	88,5	90,0
20	61,9	67,5	62,1	74,8	80,2	83,7	71,0	76,8	80,9	89,5	91,8	90,7
21	62,9	69,6	63,5	77,1	80,0	85,8	76,2	80,7	83,6	91,2	90,8	91,4
22	63,1	73,8	65,0	75,4	80,3	84,7	80,0	83,3	85,0	92,7	90,8	92,6
23	65,8	77,0	67,0	75,8	79,3	85,7	82,1	86,6	88,4	93,6	91,3	93,0
24 (Minuit)	68,9	77,9	68,8	78,1	80,3	83,4	85,3	88,5	89,4	93,7	91,9	93,2

« On voit par ces nombres que l'amplitude de la variation diurne de l'humidité relative est, comme celle de la température, beaucoup moindre au sommet de la Tour Eiffel qu'au Parc Saint-Maur. La différence porte presque entièrement sur les nombres de la nuit : tandis que dans les couches voisines du sol l'air se rapproche beaucoup de la saturation pendant la nuit, à 300 *m* de hauteur, au contraire, l'humidité relative varie beaucoup moins et l'air reste ainsi plus sec. Ce phénomène était facile à prévoir.

« 3° *Variation annuelle et variations irrégulières de l'humidité relative.* — Les moyennes mensuelles de l'humidité relative à la Tour Eiffel et à Saint-Maur sont indiquées dans le tableau suivant ; nous ferons remarquer encore que les nombres relatifs aux mois de juillet et de décembre à la Tour Eiffel ne sont pas comparables à ceux de Saint-Maur, parce qu'il n'y a eu, dans chacun de ces deux mois, que vingt-deux jours d'observation.

Moyennes mensuelles de l'humidité relative.

	Juillet.	Août.	Septembre.	Octobre.	Novembre.	Décembre.
Tour Eiffel	(66,7)	70,8	65,7	77,8	81,5	(85,1)
Parc Saint-Maur	72,2	74,6	76,5	85,9	88,0	90,3

« Dans tous les mois, l'humidité relative est moindre à la Tour Eiffel qu'au Parc Saint-Maur; cette différence tient uniquement à la nuit, pendant laquelle l'air est toujours en moyenne plus sec à 300 *m* de hauteur que près du sol, comme nous l'avons indiqué à propos de la variation diurne.

« Les variations accidentelles de l'humidité relative sont, comme celles de la température, beaucoup plus grandes et plus rapides à la Tour Eiffel que près du sol, et ces variations ne présentent fréquemment aucune analogie avec celles des couches inférieures de l'atmosphère. Souvent, tandis que l'humidité n'est que de 75 à 80 en bas, l'air est saturé au sommet de la Tour, qui se trouve dans une couche de véritables nuages ; inversement, tandis qu'en bas l'air est saturé et qu'on est dans les brouillards, il peut faire très beau et très sec à 300 *m*.

« La période du 21 au 24 novembre, que nous avons déjà signalée à propos de la pression et de la température, a offert aussi des particularités intéressantes pour l'humidité ; dans la nuit du 21 au 22, entre 1 heure et 4 heures du matin, alors que la température était de 12° plus élevée sur la Tour Eiffel qu'à Saint-Maur, l'humidité relative variait de 30 à 24 en haut et à Saint-Maur était constamment égale à 100. Pendant le même temps, la tension de la vapeur restait comprise entre 3,7 *mm* et 3,9 *mm* à Saint-Maur, et entre 2,2 *mm* et 2,6 *mm* à la Tour Eiffel ; après 4 heures du matin, au contraire, bien que l'humidité relative à la Tour soit restée beaucoup plus faible qu'à Saint-Maur, la tension de vapeur est devenue plus grande.

« Les conditions générales d'humidité, aussi bien que de température, peuvent donc différer extrêmement à 300 *m* de hauteur de celles qu'on observe près du sol.

IV. — Pluie et évaporation.

« Nous ne donnerons pas les chiffres des observations recueillis à la Tour, parce qu'ils n'ont aucune signification réelle. Le vent y est tellement fort que, dans la plupart des cas, les gouttes de pluie sont animées d'un mouvement horizontal et ne tombent pas dans le pluviomètre; il est arrivé fréquemment que, pendant des averses importantes, non seulement le pluviomètre n'indiquait rien, mais que le sol de la plate-forme du sommet n'était pas mouillé, et recevait à peine quelques gouttes, tandis que les objets verticaux ruisselaient d'eau. Pour obtenir, dans ces conditions, des nombres qui aient quelque signification, il faudrait changer complètement le mode ordinaire d'observation de la pluie, et la recueillir dans un pluviomètre dont l'entonnoir, au lieu d'être horizontal, pourrait s'incliner et se placer normalement au vent.

V. — Vitesse du vent.

« 1° *Installation des anémomètres.* — Les anémomètres employés au Bureau central météorologique et à la Tour Eiffel sont identiques; ce sont des anémomètres imaginés par MM. Richard frères; ils se composent (fig. 190) d'un moulinet formé de six ailettes en aluminium, inclinées à 45°, et rivées sur des bras très légers en acier : leurs dimensions sont calculées pour que le moulinet fasse exactement le tour pour 1 *m* de vent ; leur marche est, du reste, vérifiée sur un manège, et, s'il y a lieu, on établit pour chaque appareil une table de correction. Comme le moulinet tourne dans un plan vertical et doit toujours se présenter normalement au vent, il est monté à l'extrémité d'une pièce horizontale formant girouette et tournant autour d'un axe vertical, qui est placé très près du plan de rotation des ailettes, afin de diminuer autant que possible la distance que le moulinet doit parcourir pour s'orienter. L'orientation est assurée par une queue rivée à l'autre extrémité de la girouette, et formée de deux plaques de tôle ajustées en angle aigu. Le moulinet complet ne pèse que 150 *g*; il offre à l'air une surface de 6 décimètres carrés environ, et son axe de rotation se trouve constamment lubrifié par un dispositif spécial placé dans la boîte métallique que l'on aperçoit sur la figure, immédiatement derrière le moulinet, et qui contient également les appareils interrupteurs du courant.

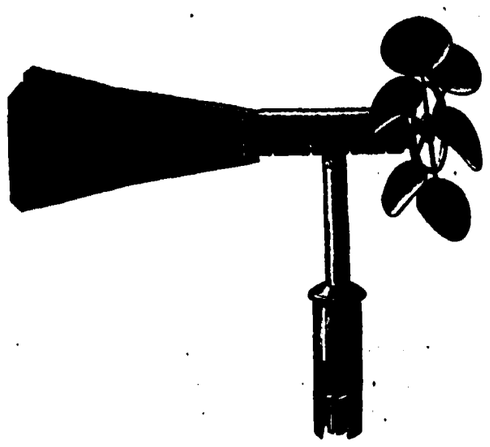


Fig. 190.

« Cet instrument est d'une sensibilité remarquable et peut mesurer des vitesses qui ne dépassent pas 0,1 *m* à 0,2 *m* par seconde; il se met instantanément à tourner dès que le vent commence à souffler, et s'arrête aussitôt que le vent cesse, tandis que le moulinet de Robinson, à cause de sa grande masse et de sa faible surface utile, prend un certain temps pour acquérir sa vitesse et, une fois lancé, continue à tourner longtemps après que le vent a cessé.

« Les moulinets de ce genre, installés au Bureau central et à la Tour Eiffel, transmettent leurs indications sur des cinémographes de MM. Richard frères, qui indiquent à la fois la vitesse du vent à chaque instant en mètres par seconde, et le temps pendant lequel le vent a parcouru une distance de 5 *km*. Nous reproduisons la figure qui indique la disposition de l'appareil récepteur (fig. 191). Le cylindre enregistreur fait une révolution en un jour, et une heure correspond à une longueur de 15,15 *mm*; la minute est donc représentée par 0,25 *mm* environ, quantité encore appréciable. La figure montre sur le cylindre, à la partie inférieure, la courbe qui donne à chaque instant la vitesse du vent en mètres par seconde ; à la partie supérieure, on distingue les traits du totalisateur, dont l'intervalle correspond à une distance totale de 5 *km* parcourue par le vent. En mesurant au planimètre l'aire de la courbe inférieure, on s'assure aisément qu'elle concorde toujours exactement avec les sommes données par le totalisateur.

« L'anémomètre de la Tour Eiffel est installé à l'altitude de 338,5 *m* et à 305 *m* du sol, au-dessus de la girouette C (fig. 188). Pendant la durée de l'Exposition, l'appareil récepteur était placé dans la vitrine de

MM. Richard frères, dans le Palais des Arts libéraux. En novembre 1889, il a été transporté dans la salle des machines de la Tour, à la base du pilier Sud. Les observations ont commencé le 16 juin 1889 ; il y a eu deux jours d'interruption en novembre (le 10 et le 11) au moment du transport du récepteur de l'Exposition à

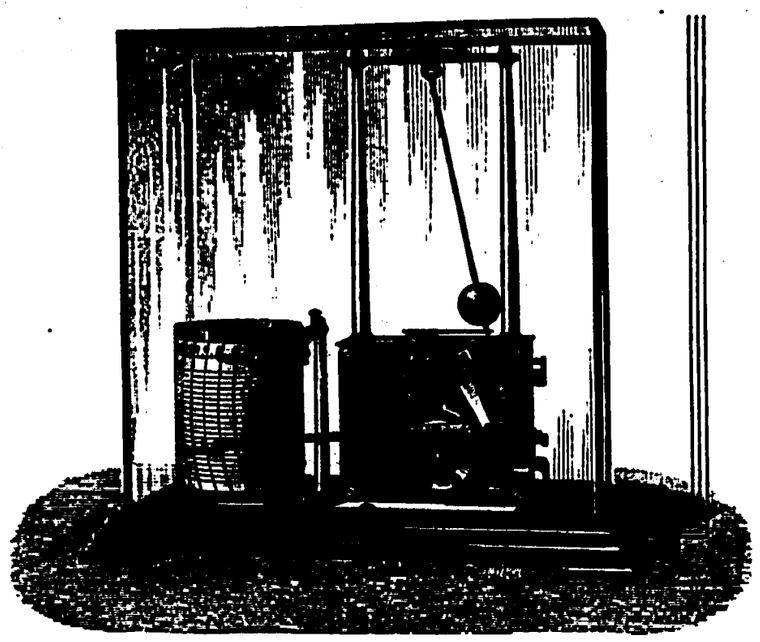


Fig. 191.

la salle des machines de la Tour, et six jours en décembre, du 13 au 19, par suite d'un givre épais qui a immobilisé entièrement le moulinet.

« Au Bureau météorologique, l'anémomètre Richard est installé à l'angle nord-ouest de la tourelle à l'altitude de 54 *m*, et à 20,9 *m* du sol. L'appareil récepteur est dans la pièce qui est immédiatement au-dessous de la terrasse.

« Les enregistreurs de la Tour Eiffel, qui avaient été installés provisoirement en novembre 1889 dans la salle des machines de la Tour, à la base du pilier Sud, ont été transportés en novembre 1890 dans une salle du rez-de-chaussée du Bureau météorologique, qui a été reliée à la Tour Eiffel par un câble à 20 fils.

« A l'anémo-cinémographe de MM. Richard frères, employé au sommet de la Tour Eiffel depuis l'origine des observations et dont l'appareil enregistreur est représenté figure 191, on a pu, en octobre 1890, ajouter un autre cinémographe à indications instantanées, duquel M. Eiffel a fait don au Bureau central météorologique. Le dessin en est reproduit figure 192. »

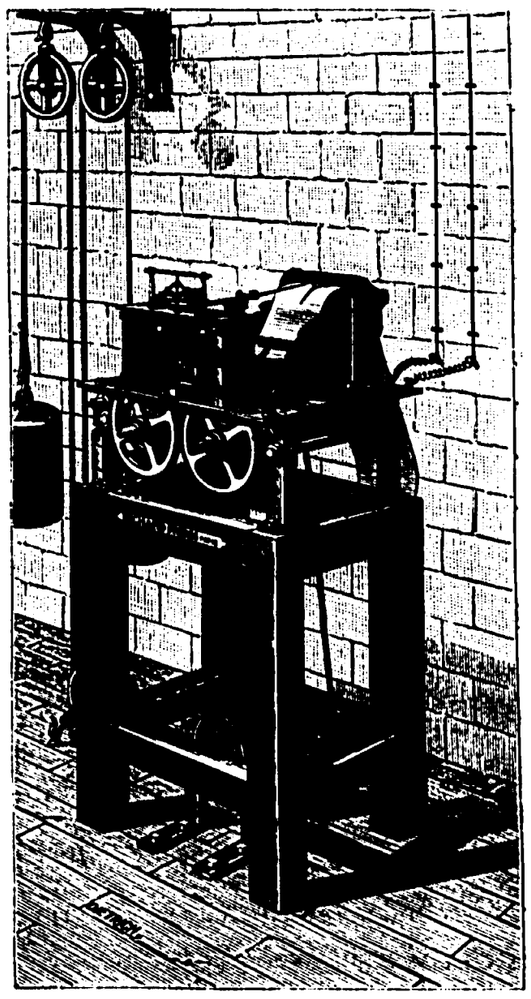


Fig. 192.

Nous donnons également (fig. 193), d'après un article de M. Alfred Angot dans *la Nature* du 9 mai 1891, la disposition de la pièce du Bureau météorologique où ont été réunis tous les enregistreurs de la Tour.

« Le câble électrique à 20 fils, qui vient de la Tour par les égouts du Champ de Mars et de la rue de l'Université, aboutit dans une boîte de communications F d'où sortent ensuite les fils qui se rendent, comme le montre la figure, aux divers appareils récepteurs. Ces appareils, qui ont tous été imaginés et construits par MM. Richard frères, sont les suivants :

« En E, tout au bout de la table, est le thermomètre. Cet appareil fonctionne par cinquièmes de degré, c'est-à-dire que dès que la température au sommet monte ou baisse d'un cinquième de degré, la plume du récepteur E s'élève ou s'abaisse de la même quantité vis-à-vis d'une feuille de papier enroulée sur un cylindre qui fait un tour entier en une semaine. On trouve donc au bout de la semaine sur ce papier une courbe continue qui donne tous les mouvements de la température pendant ce temps.

« En C est la girouette, qui, au moyen de trois fils seulement, enregistre les variations de la direction du vent par cent-vingt-huitièmes de circonférence, c'est-à-dire que l'appareil est assez sensible pour donner trente-deux directions intermédiaires entre le nord et l'ouest, par exemple.

« En B est l'enregistreur de la composante verticale du vent; la plume de cet instrument se déplace de gauche à droite quand le vent est ascendant, de droite à gauche quand le vent descend, et les déplacements sont proportionnels, à chaque instant, à la vitesse du vent dans un sens ou dans l'autre.

« Enfin en A et en D sont deux anémomètres qui indiquent la vitesse horizontale du vent; le premier est actionné par le moulinet de Robinson, qui est en usage dans la plupart des stations météorologiques; le second est actionné par un moulinet spécial, beaucoup plus sensible et plus exact, imaginé par MM. Richard frères.

« Ces deux derniers instruments inscrivent la vitesse du vent en mètres par seconde sur un cylindre qui fait

Fig. 193. — Appareils enregistrant à la surface du sol, rue de l'Université (Bureau central météorologique), les indications données par les instruments placés au sommet de la Tour Eiffel.

sa révolution entière en une journée, et sur lequel il est difficile de distinguer des intervalles de temps plus petits qu'une minute. Comme la vitesse du vent varie avec une extrême rapidité, il y a grand intérêt à pouvoir, lors des tempêtes, obtenir des détails beaucoup plus grands et surtout à mesurer exactement alors les maxima de la vitesse. C'est à cet objet qu'est destiné le cinémographe à indications instantanées de MM. Richard frères, que l'on aperçoit en G à la droite de la figure. Dans cet appareil, la vitesse du vent s'inscrit à chaque instant sur une bande de papier qui se déroule avec une vitesse de 3 *cm* par minute; une seconde de temps correspond donc à un demi-millimètre, quantité parfaitement appréciable. Cet appareil, qui débite en vingt-quatre heures une longueur de 43,20 *m* de papier, serait impossible à employer d'une manière courante; il faudrait dépenser plus d'une journée de travail à relever les indications qu'il fournit pour quelques heures; il est donc réservé seulement pour les moments intéressants, pour les tempêtes.

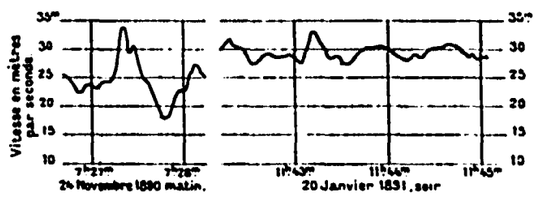


Fig. 194. — Spécimens des courbes obtenues par les anémomètres.

« Dans ce but, il est muni d'une sorte de verrou qui est commandé électriquement par l'anémomètre ordinaire D; tant que ce dernier instrument indique une vitesse du vent inférieure à 20 *m* par seconde, le verrou de G est fermé et cet appareil reste au repos; dès que la vitesse du vent sur l'anémomètre D atteint 20 *m*, le verrou de G s'ouvre et l'anémomètre entre en action sans pour cela interrompre la marche de D; les deux appareils fonctionnent alors simultanément, D donnant les grandes variations de la vitesse du vent et G les plus petits détails, et cela jusqu'au moment où la vitesse du vent retombe au-dessous de 16 *m* par seconde; G s'arrête alors de nouveau automatiquement.

« Nous donnons ici (fig. 194) deux réductions des courbes obtenues avec ce dernier instrument; dans les courbes originales, la distance qui sépare deux traits verticaux, et qui correspond à une minute, est exactement de 3 *cm*.

« On remarquera particulièrement la courbe obtenue le 24 novembre 1890 entre 7^h27^m et 7^h28^m du matin ; le vent avait à ce moment une variabilité extrême : en moins de trente secondes, il a passé de 34 *m* à 18 *m* ; les pressions correspondantes auraient été respectivement de 116 *kg* et de 32 *kg* par m^2. On voit ainsi à quelles énormes variations de pression un corps est exposé en quelques secondes pendant les tempêtes.

« L'autre courbe qui a été obtenue pendant le coup de vent de la nuit du 20 au 21 janvier 1891, est, au contraire, beaucoup plus régulière.

« Parmi les instruments énumérés plus haut, il n'y a pas de baromètre. On a reconnu que les variations de pression, en haut et en bas de la Tour, étaient assez peu différentes pour qu'il n'y eût aucun intérêt à transmettre en bas les fluctuations de la pression au sommet ; elles sont enregistrées sur place par un baromètre ordinaire.

« 2° *Variation diurne de la vitesse du vent.* — Nous donnons dans le tableau suivant, pour chaque mois, les moyennes horaires de la vitesse du vent en mètres par seconde au Bureau météorologique et à la Tour Eiffel, pour toute la période que comprennent les observations jusqu'à la fin de l'année 1889.

	Tour Eiffel.						Bureau météorologique (Terrasse).					
Heures.	Juillet.	Août.	Septembre.	Octobre.	Nov. (28 j.)	Déc. (25 j.)	Juillet.	Août.	Septembre.	Octobre.	Novembre.	Décembre.
	m	*m*	*m*	*m*	*m*	*m*	*m*	*m*	*m*	*m*	*m*	*m*
0 (Minuit).....	9,22	7,25	9,73	9,36	7,87	8,22	1,93	2,00	1,70	1,34	1,72	1,64
1	8,64	7,74	9,39	9,08	8,09	8,16	1,64	1,81	1,64	1,30	1,68	1,64
2	8,12	7,48	9,14	8,64	8,39	8,53	1,62	1,75	1,45	1,32	1,45	1,50
3	8,08	7,47	8,70	8,78	7,90	8,42	1,56	1,74	1,52	1,11	1,28	1,60
4	7,79	7,00	8,81	9,02	7,93	8,62	1,54	1,71	1,47	1,19	1,56	1,54
5	7,69	6,98	8,30	8,90	7,96	9,01	1,50	1,56	1,38	1,16	1,61	1,69
6	7,31	6,22	8,10	9,39	8,06	8,71	1,70	1,68	1,43	1,38	1,50	1,77
7	6,60	5,88	8,15	9,55	8,34	8,57	2,17	1,89	1,41	1,42	1,64	1,68
8	6,00	4,72	7,19	9,14	7,75	8,62	2,25	2,31	1,72	1,46	1,49	1,83
9	6,08	4,71	6,56	8,63	7,34	8,47	2,69	2,45	2,10	1,84	1,56	1,91
10	5,94	4,88	5,96	8,05	6,63	7,95	2,83	2,75	2,48	2,15	1,81	2,04
11	6,80	5,58	6,33	7,39	6,53	7,48	3,12	3,08	2,71	2,59	2,08	2,16
12 (Midi).....	7,27	5,62	6,16	7,36	6,60	7,60	3,28	3,15	2,78	2,86	2,13	2,28
13	7,17	6,11	6,54	7,35	6,70	7,72	3,18	3,46	2,84	2,61	2,27	2,43
14	7,21	6,05	6,82	7,54	6,54	7,77	3,24	3,15	2,97	2,77	2,34	2,30
15	6,86	5,74	6,84	7,27	6,68	7,60	3,12	2,88	2,65	2,32	1,95	2,12
16	7,50	5,81	6,52	7,67	7,29	7,87	3,28	2,72	2,51	1,97	2,06	2,28
17	7,42	6,17	6,58	7,77	7,75	8,14	3,18	2,86	2,13	1,45	1,93	2,28
18	7,46	5,74	7,30	8,76	8,07	8,33	2,92	2,53	1,86	1,28	2,07	2,18
19	7,34	5,86	8,07	8,94	8,23	8,47	2,56	1,87	1,67	1,16	1,98	2,02
20	7,92	6,40	9,10	9,62	8,39	8,72	2,08	1,77	2,01	1,25	1,82	1,87
21	8,46	6,57	9,74	9,13	8,14	8,36	2,05	1,77	2,08	1,43	1,81	1,77
22	8,97	6,97	10,35	9,12	8,01	8,04	1,91	2,20	1,95	1,32	1,89	1,63
23	9,04	7,26	10,38	9,16	7,90	7,70	1,91	1,94	1,96	1,26	1,50	1,48
24 (Minuit).....	9,17	7,16	9,77	9,24	7,78	8,31	1,85	2,00	1,79	1,25	1,83	1,60

« Dans tous les mois, sans exception, la variation diurne de la vitesse du vent au Bureau météorologique

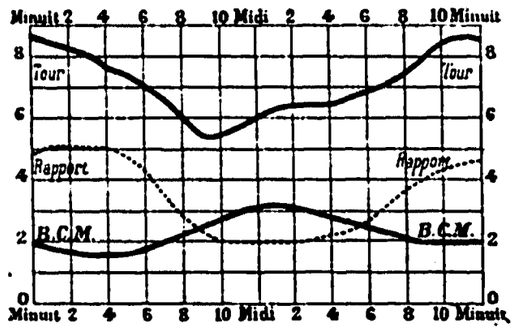


Fig. 195.

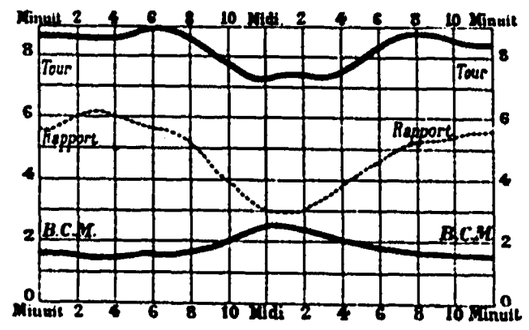


Fig. 196.

offre les caractères normaux · il y a un minimum le matin vers l'heure du lever du soleil et un maximum vers 1 heure de l'après-midi ; et l'amplitude est plus grande en été qu'en hiver.

« A la Tour Eiffel, la variation diurne est toute différente : le maximum se présente au milieu de la nuit et le minimum le matin vers 10 heures dans la saison chaude et plus tard encore en hiver. Ces caractères opposés se remarquent aisément sur les figures 195 et 196, qui représentent la variation diurne de la vitesse du vent à la Tour et au Bureau respectivement pendant les trois mois chauds (juin-septembre) et les trois mois froids (octobre-décembre) que comprend la période d'observation. La variation diurne de la vitesse du vent sur la Tour Eiffel est donc ainsi tout à fait analogue à celle que l'on observe au sommet des hautes montagnes.

« Cette inversion dans la variation diurne de la vitesse du vent en haut de la Tour et près du sol est encore mise plus nettement en évidence par les courbes ponctuées des figures 195 et 196, qui représentent la variation diurne du rapport des vitesses dans les deux stations. Aussi bien dans les mois chauds que dans les mois froids, ce rapport est maximum vers 3 heures du matin et minimum dans la journée; dans la nuit, la vitesse sur la Tour est de cinq à six fois plus grande qu'au Bureau, tandis que le rapport est seulement de deux à trois au milieu du jour.

« C'est certainement la première fois qu'on constate une variation diurne semblable à une aussi petite hauteur dans l'atmosphère, et c'est un des résultats les plus intéressants que les observations de la Tour aient fourni jusqu'à ce jour. Il en résulte que la variation diurne de la vitesse du vent telle qu'on la constate dans tous les observatoires, à une petite distance du sol, est un phénomène local qui est produit par l'échauffement diurne dans les couches les plus basses de l'atmosphère, et qui a déjà disparu complètement dans l'air libre à une distance de 300 *m* du sol.

« 3° *Variation annuelle de la vitesse du vent.* — Nous donnons dans le tableau suivant les valeurs moyennes de la vitesse du vent à la Tour Eiffel et au Bureau météorologique pour tous les mois pendant lesquels les observations ont été poursuivies.

Vitesse moyenne du vent.

	Bureau météorologique (1889).	Tour Eiffel (1889).
Juillet	2,39	7,54
Août	2,30	6,26
Septembre	2,02	7,95
Octobre	1,66	8,56
Novembre	1,80	7,63 (1)
Décembre	1,90	8,21 (2)
Moyenne	2,11	7,69

« La période d'observations est encore trop courte pour qu'on puisse en déduire quelques conclusions sur la variation annuelle de la vitesse du vent. On remarquera seulement qu'il n'y a aucune analogie entre les vitesses moyennes observées à la Tour et au Bureau météorologique ; dans les six derniers mois de 1889, la plus grande vitesse moyenne à la Tour est celle d'octobre ; ce même mois, au contraire, est celui qui donne la plus petite vitesse moyenne au Bureau météorologique.

« Les vitesses moyennes indiquées ci-dessus sont les moyennes des vingt-quatre observations horaires ; elles diffèrent nécessairement un peu de la moyenne vraie qui serait obtenue en prenant le quotient du chemin total parcouru par le vent par le temps. Cette différence provient de ce que, le vent étant souvent très variable, vingt-quatre observations équidistantes ne suffisent pas pour représenter exactement le phénomène ; le vent peut, par exemple, tomber à zéro dans une partie du temps, alors qu'il a une vitesse notable aux époques d'observations.

« Le cinémographe Richard donne à la fois la vitesse à chaque instant et le total du chemin parcouru par le vent dans un intervalle quelconque ; il est donc facile d'en déduire la vitesse moyenne vraie de chaque mois. Nous donnons ces valeurs dans le tableau suivant, qui indique, pour chaque mois de 1889, le chemin total parcouru par le vent en kilomètres et la vitesse moyenne vraie correspondante en mètres par seconde. Les observations des deux premiers mois, étant incomplètes pour le total du chemin parcouru, ne figurent pas sur ce tableau.

Vitesse moyenne vraie au Bureau météorologique.

		Chemin total.	Vitesse moyenne.
		km	m
1889.	Juillet	6.072	2,27
	Août	5.740	2,14
	Septembre	4.786	1,85
	Octobre	4.169	1,56
	Novembre	4.391	1,69
	Décembre	4.992	1,86

« Les vitesses moyennes vraies ainsi obtenues sont toutes plus faibles que les moyennes des vingt-quatre observations. La différence moyenne est de 0,12 *m*, les différences extrêmes étant 0,17 *m* (septembre) et 0,04 *m* (décembre).

(1) Moyenne pour 28 jours; lacune le 10 et le 11, pendant le déplacement de l'enregistreur.
(2) Moyenne pour 25 jours; lacune du 13 au 18, causée par le givre.

« A la Tour Eiffel, où le vent est beaucoup plus régulier que près du sol, il n'y a pas de différence appréciable entre la moyenne vraie et la moyenne de vingt-quatre heures.

VI. — Direction du vent.

« 1° *Méthodes d'observation.* — La direction du vent est enregistrée d'une manière continue au Bureau central au moyen d'une girouette ordinaire à deux ailes, très mobile, placée à l'angle nord-est de la tourelle; l'axe de cette girouette commande directement un cylindre vertical sur lequel est enroulée une feuille de papier; une plume, mue par un mouvement d'horlogerie, descend en vingt-quatre heures suivant une génératrice du cylindre et marque ainsi à chaque instant la direction du vent. La circonférence qui correspond à une rotation complète du vent a sur le papier 157 *mm* de longueur, et la plume descend exactement d'un centimètre par heure.

« A la Tour Eiffel, la girouette est installée en C (fig. 188). Elle se compose de deux roues montées sur un même axe horizontal et dont l'ensemble peut se mouvoir autour d'un axe vertical; quand les roues ne sont pas orientées exactement dans la direction du vent, elles se mettent à tourner, ce qui change en même temps leur orientation. Cette disposition a l'avantage, tout en conservant une grande sensibilité à l'appareil, de diminuer les oscillations brusques que présentent fréquemment les girouettes.

« Au moyen d'un système de transmission électrique spécial, à trois fils seulement, imaginé par MM. Richard frères, tous les mouvements de la girouette se reproduisent à distance sur un cylindre vertical identique à celui de la girouette enregistrante du Bureau météorologique, que nous avons décrite plus haut. Les contacts sont établis de façon que la transmission s'effectue par $\frac{1}{128}$ de circonférence, c'est-à-dire qu'il suffit que la direction du vent change de $\frac{1}{128}$ de circonférence, c'est-à-dire de 2°48′45″, pour que le cylindre récepteur placé à une grande distance tourne dans le sens convenable de la même quantité; cet intervalle est tellement petit que la courbe reproduit exactement l'apparence des courbes obtenues par transmission mécanique directe. Pendant la durée de l'Exposition, l'appareil récepteur était placé à côté de ceux des anémomètres, dans la vitrine de MM. Richard frères; du mois de novembre 1889 au mois d'octobre 1890, il a été transporté dans la salle des machines de la Tour Eiffel, à la base du pilier Sud. Enfin, depuis le mois d'octobre 1890, il a été installé définitivement au Bureau météorologique même.

« Le dépouillement des courbes obtenues tant au Bureau qu'à la Tour Eiffel a été fait de la même manière, en relevant à chaque heure la direction du vent; cette direction est notée en chiffres de 0 à 32,0 correspondant à N., 2 à N.-N-.E., 8 à E., 16 à S., 24 à O., et ainsi de suite. La direction du vent est donc appréciée à moins de $\frac{1}{64}$ de circonférence, c'est-à-dire environ à 5° près, ce qui a paru suffisant. On a supprimé la direction du vent et noté *calme* toutes les fois que la vitesse du vent au moment de l'observation était inférieure à 0,5 *m* au Bureau météorologique et à 1 *m* à la Tour Eiffel, car en dessous de ces limites on n'est plus sûr que les girouettes obéissent au vent et s'orientent exactement. »

2° *Direction du vent au Bureau météorologique et à la Tour Eiffel.* — Nous donnons dans le tableau suivant le nombre de fois que le vent a soufflé de chaque direction dans tous les mois, et le nombre des calmes, en ne considérant, pour abréger, que les quatre quadrants N., E., S. et O., sans tenir compte des intermédiaires qui figurent en détail dans le rapport de M. Angot.

Fréquence des différentes directions de vent en 1889 au B. C. M. et à la T. E. S.

Directions.	Juillet.		Août.		Septembre.		Octobre.		Novembre.		Décembre.		Totaux.		Rapports.	
	B. C. M.	T. E. S.	B. C. M.	T. E. S.	B. C. M.	T. E. S.	B. C. M.	T. E. S.	B. C. M.	T. E. S.	B. C. M.	T. E. S.	B. C. M.	T. E. S.	B. C. M.	T. E. S.
Secteur Nord (N.-E. à N.-O.)	136	141	20	78	161	217	30	48	109	188	67	148	523	823	11,8	18,6
Secteur Est (N.-E. à S.-E.)	89	130	38	44	149	168	72	67	184	162	213	222	745	793	16,9	17,9
Secteur Sud (S.-E. à S.-O.)	93	115	105	180	43	74	354	423	112	197	223	248	930	1.237	21,1	28,1
Secteur Ouest (S.-O. à N.-O.)	363	344	461	408	278	249	154	199	179	155	109	119	1.544	1.474	34,9	33,3
Calmes	63	11	120	34	89	12	134	7	136	18	132	7	674	89	15,3	2,1
													4.416	4.416	100,0	100,0

Il résulte de l'examen de ce tableau :

1° Que le nombre des journées calmes est beaucoup plus grand à la base qu'au sommet de la Tour, 15 p. 100 et 2 p. 100 ;

2° Que les vents de la région du Nord et de celle du Sud sont beaucoup plus fréquents au sommet qu'à la base.

Un tableau analogue, établi pour les cinq années suivantes, indique la même proportion des calmes, mais une prédominance des vents du secteur Ouest par rapport aux autres.

En dehors de la girouette et des anémomètres dont nous venons de résumer les données, on a installé au sommet de la Tour Eiffel, en juillet 1889, un moulinet destiné à l'étude de la composante verticale des vents. Cet instrument, désigné par la lettre B sur la figure 188, se compose de quatre ailettes planes, inclinées à 45° et mobiles autour d'un axe vertical. Par sa construction même, ce moulinet reste immobile dans un courant d'air horizontal, tourne dans un sens quand le vent a une composante verticale ascendante, et dans l'autre sens quand le vent a une composante verticale descendante. Toutefois, l'observation de cet instrument présente de grandes difficultés; il peut tourner même dans un courant parfaitement horizontal, si la vitesse du vent n'est pas rigoureusement la même aux deux extrémités du diamètre du moulinet, et il suffit pour cela du plus petit obstacle. Les premières observations, obtenues en 1889, ont révélé une cause d'erreur de ce genre, due à la présence de la tige centrale qui porte le paratonnerre.

VII. — Examen d'ensemble des observations de 1889.

M. Angot a résumé, dans un article paru dans *la Nature* du 25 janvier 1890, l'ensemble de ses observations de 1889. Nous le reproduisons ci-dessous, en raison de son intérêt, bien qu'il y ait quelques répétitions par rapport à l'examen détaillé qui vient d'être exposé.

« Ce qui frappe tout d'abord dans l'observation du vent, c'est la force tout à fait imprévue qu'il possède déjà à 300 *m* de hauteur. Les cent une premières journées d'observation qu'on a recueillies entre le milieu de juin et le 1er octobre, dans la belle saison, ont donné une vitesse moyenne de 7,05 *m* par seconde, ou plus de 25 *km* à l'heure. Pendant la même période, un instrument identique à celui de la Tour Eiffel, placé sur la tourelle du Bureau central météorologique à 21 *m* au-dessus du sol, et à une distance horizontale d'environ 500 *m* de la Tour, indiquait seulement une vitesse moyenne de 2,24 *m*, c'est-à-dire un peu moins du tiers de ce qu'on observait au sommet de la Tour. On savait bien que la vitesse du vent augmente avec la hauteur, car, près du sol, les mouvements de l'air sont gênés et retardés par le frottement contre toutes les aspérités, collines, maisons, arbres, etc.; mais on n'admettait pas jusqu'ici une loi de variation aussi rapide. Ce fait a une très grande importance pour les études relatives à la navigation aérienne ; il importe, en effet, de savoir pendant combien de temps en moyenne la vitesse du vent reste au-dessous de telle ou telle valeur, contre laquelle peut lutter avantageusement la machine du ballon dirigeable. Or, pendant la période que nous avons étudiée, la vitesse du vent à 300 *m* a été pendant 39 p. 100 du temps supérieure à 8 *m* par seconde, et pendant 21 p. 100 supérieure à 10 *m*.

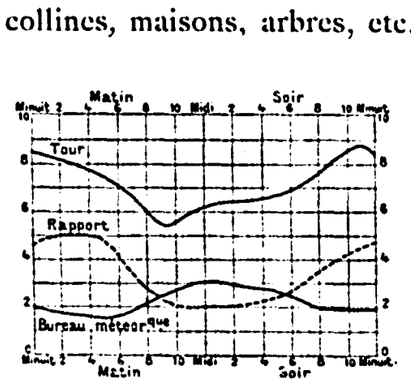


Fig. 197. — Variation diurne de la vitesse du vent sur la Tour Eiffel et au Bureau météorologique.

« Les observations anémométriques de la Tour Eiffel ont mis en évidence un autre fait encore plus imprévu que la grandeur même de la vitesse du vent : c'est la manière dont cette vitesse varie régulièrement dans le cours de la journée.

« Les deux courbes en traits pleins de la figure 197 donnent respectivement pour la Tour Eiffel et le Bureau météorologique la loi de variation diurne de la vitesse du vent. Au Bureau météorologique, comme du reste dans toutes les stations basses, la vitesse est la plus faible vers le lever du soleil (1,6 *m* à 5 heures du matin) et la plus forte au milieu du jour (3,1 *m* à 1 heure du soir). A la Tour Eiffel, au contraire, la plus petite vitesse (5,4 *m*) s'observe entre 9 et 10 heures du matin, et la plus grande se produit au milieu de la nuit (8,8 *m* à 11 heures du soir). C'est presque exactement ce qui se passe au sommet des montagnes, comme au Puy de Dôme et au Pic du Midi, où la vitesse du vent est maximum pendant la nuit et minimum au milieu

du jour, suivant ainsi une marche inverse de celle des régions basses. Cette inversion est encore mise plus nettement en évidence par la courbe pointillée de la figure 197, qui donne pour chaque instant le rapport des vitesses du vent à la Tour Eiffel et au Bureau météorologique. Ce rapport est le plus grand et égal à 5 entre 2 et 4 heures du matin, le plus petit est égal à 2 entre 10 heures du matin et 3 heures du soir ; sa variation diurne présente exactement la forme caractéristique de celle de la vitesse du vent sur les montagnes. C'est certainement la première fois que l'on signale une variation semblable à une hauteur aussi faible dans l'atmosphère.

« Au point de vue de la vitesse du vent, considérée soit dans sa grandeur absolue, soit dans sa variation diurne, la Tour Eiffel se rapproche donc beaucoup plus des stations de montagnes que des stations ordinaires. Il en est de même pour la température. En admettant, comme d'ordinaire, une décroissance de 1° pour 180 *m* d'altitude, le thermomètre devrait être constamment plus bas au sommet de la Tour de 1°,6 qu'au niveau du sol, dans la campagne des environs de Paris, à l'Observatoire du Parc Saint-Maur, par exemple. Nous avons pris cette station comme terme de comparaison au lieu d'un point situé dans Paris même, plus près de la Tour, parce que la température de Paris n'existe pas, à proprement parler ; elle est absolument artificielle et peut varier de plusieurs degrés suivant l'emplacement des instruments, l'état du ciel, la direction du vent, etc.

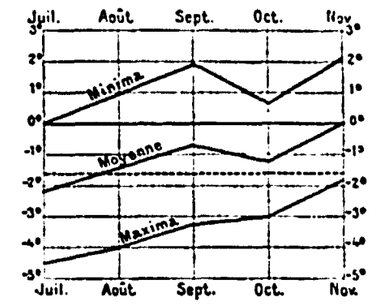


Fig. 198. — Différences de température entre la Tour Eiffel et Paris

« La figure 198 donne, pour chaque mois, la différence moyenne entre la Tour Eiffel et le Parc Saint-Maur, non seulement pour la température moyenne (ligne du milieu), mais pour la température minima de chaque jour (ligne supérieure) et pour la température maxima (ligne inférieure).

« Dans tous les mois sans exception, au moment du maximum diurne, la température, au sommet de la Tour, est plus basse qu'au pied ; la différence est même beaucoup plus grande que la valeur théorique 1°,6 que nous avons indiquée et qui est représentée sur le diagramme par une ligne ponctuée ; les journées sont donc

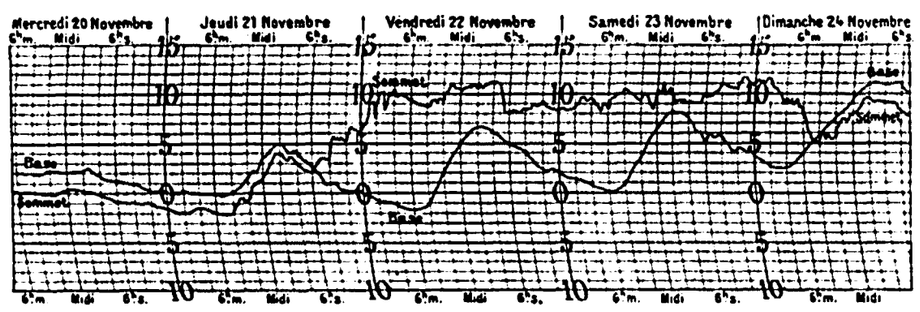


Fig. 199. — Marche de la température au sommet et à la base de la Tour Eiffel du 20 au 24 novembre 1889.

relativement froides au sommet. Par contre, les nuits (minima, ligne supérieure) sont très chaudes : non seulement la différence entre le sommet et la base n'atteint pas 1°,6, mais c'est le sommet qui est le plus chaud en valeur absolue. Au sommet de la Tour, les journées sont donc relativement fraîches et les nuits chaudes ; l'amplitude de la variation diurne de la température est beaucoup moindre que près du sol.

« La cause principale de ces différences est la faiblesse des pouvoirs absorbant et émissif de l'air, qui s'échauffe très peu directement pendant le jour et se refroidit aussi très peu pendant la nuit : la variation diurne de la température, à une certaine hauteur dans l'air libre, doit donc être petite ; elle devient plus grande dans les couches inférieures de l'atmosphère, auxquelles se communiquent par contact les variations de température considérables que subit le sol. Dans les 200 ou 300 premiers mètres d'air à partir du sol, la décroissance de la température est ainsi très rapide le jour et très lente la nuit, où même il fait normalement plus chaud à une certaine hauteur que près du sol, quand le temps est calme et beau. Ces considérations sont vérifiées de la manière la plus complète par les observations de la Tour ; dans les nuits calmes et claires, en particulier, la température y est fréquemment de 5° à 6° plus haute au sommet qu'à la base.

« Des différences analogues ont été observées fréquemment dans les observatoires de montagnes ; mais elles y sont beaucoup moins marquées. C'est que, dans ces stations, la masse de la montagne exerce

encore une influence considérable, tandis qu'à la Tour Eiffel on est réellement dans l'air libre. C'est ainsi que l'amplitude de la variation diurne de la température à la Tour Eiffel, à 336 *m* au-dessus du niveau de la mer, est presque égale et même plutôt inférieure à celle que l'on observe au sommet du Puy de Dôme, à 1.470 *m*.

« La marche annuelle de la température au sommet de la Tour (ligne du milieu, fig. 198) paraît, autant qu'on en peut juger d'après cinq mois seulement d'observation, suivre les mêmes lois que la variation diurne; la température moyenne semble plus basse que la normale pendant la saison chaude, et plus élevée, au contraire, pendant la saison froide. En dehors de ces causes régulières, des causes accidentelles peuvent produire des différences de température encore plus remarquables entre le haut et le bas de la Tour Eiffel. Au moment des changements de temps, la modification se manifeste parfois complètement à 300 *m* de hauteur plusieurs heures et même plusieurs jours avant de se produire près du sol. Le mois de novembre dernier en a fourni un exemple frappant.

« Du 10 au 24 novembre a régné, sur nos régions, une période de hautes pressions, avec calme ou vents très faibles venant généralement de l'est, et température basse, surtout dans les derniers jours ; c'est seulement dans la journée du 24 que le vent passe sud-sud-ouest et devient fort ; la température remonte, le ciel se couvre et le mauvais temps commence. Or, à la Tour, la température était encore basse le 21 avec vent faible du sud-est, lorsque, vers 6 heures du soir, le vent prend brusquement de la force et tourne au sud, puis se fixe au sud-sud-ouest ; en même temps, la température, au lieu de baisser, comme elle aurait dû le faire normalement, remonte de plus de 8° jusque vers 2 heures du matin le 22, comme on le voit sur la figure 199 qui reproduit les courbes des thermomètres enregistreurs installés au sommet de la Tour et à la base (pilier Est). Depuis ce moment, la température est restée haute au sommet, de sorte que, dans tout l'intervalle compris entre le soir du 21 et le matin du 24, il a fait constamment beaucoup plus chaud en haut de la Tour qu'au niveau du sol. Le changement de régime s'est donc manifesté à 300 *m* de hauteur plus de deux jours avant de se faire sentir dans les régions inférieures. Ce qu'il y a de plus remarquable, c'est que rien absolument en bas ne pouvait indiquer ce changement ; depuis le soir du 21 jusqu'au matin du 24, le ciel a été constamment d'une pureté parfaite, sans aucun nuage, et un calme complet régnait en bas, alors qu'en haut de la Tour soufflait un vent chaud du sud-sud-ouest, animé d'une vitesse de 6 à 8 *m* par seconde.

« Les observations de température, aussi bien que celles de la vitesse du vent, montrent ainsi, d'une manière tout à fait imprévue, à quel point les conditions météorologiques à 300 *m* seulement de hauteur peuvent différer de celles que l'on observe près du sol. Malgré son altitude relativement faible, la station météorologique de la Tour Eiffel est donc des plus intéressantes ; c'est la première qui nous donne réellement des observations faites dans l'air libre, en dehors de l'influence du sol, et il est probable qu'elle réserve encore aux météorologistes plus d'une surprise et plus d'un enseignement. »

§ 3. — Observations de 1890 à 1894.

« Les observations météorologiques comparatives, commencées au Bureau central et sur la Tour Eiffel, dès l'achèvement de la Tour, au milieu de l'année 1889, ne sont devenues réellement complètes qu'à la fin de la même année ; elles comprennent donc actuellement cinq années entières, période assez longue déjà pour que l'on puisse en déduire quelques résultats généraux.

« Les résumés des observations ont été publiés, chaque année, dans le tome I (partie B) des *Annales du Bureau central météorologique* ; on a donné aussi régulièrement, dans le tome II des mêmes *Annales*, le détail quotidien des huit observations trihoraires au sommet de la Tour. »

I. — Températures.

« *Variation diurne de la température.* — Nous ne donnons les tableaux détaillés que pour le Bureau météorologique (cour), l'observatoire de Saint-Maur et le sommet de la Tour Eiffel, en omettant les observations pour les deux stations intermédiaires de la Tour.

1890-1894. — *Température moyenne au Bureau météorologique* (cour).

Heures.	Janvier.	Février.	Mars.	Avril.	Mai.	Juin.	Juillet.	Août.	Septembre.	Octobre.	Novembre.	Décembre.
0 (Minuit).....	2°,06	3°,84	5°,83	9°,35	11°,71	15°,10	16°,18	16°,15	13°,67	9°,08	6°,30	2°,37
1.....	1,93	3,65	5,50	8,73	11,19	14,59	15,59	15,61	13,31	9,49	6,18	2,15
2.....	1,83	3,50	5,17	8,24	10,80	14,18	15,20	15,26	12,97	9,27	6,03	2,03
3.....	1,72	3,33	4,89	7,80	10,40	13,74	14,84	14,88	12,62	9,00	5,88	1,92
4.....	1,59	3,19	4,64	7,44	10,10	13,41	14,58	14,63	12,39	8,83	5,78	1,84
5..... .	1,50	3,07	4,39	7,10	10,03	13,42	14,50	14,41	12,09	8,71	5,70	1,75
6.....	1,45	2,96	4,26	7,15	10,61	14,03	14,99	14,62	11,98	8,57	5,63	1,70
7.....	1,44	2,89	4,46	8,01	12,03	15,40	16,22	15,65	12,54	8,62	5,62	1,67
8.....	1,54	3,04	5,29	9,82	13,59	16,62	17,55	17,15	13,83	9,26	5,82	1,74
9.....	1,77	3,60	6,50	11,55	14,90	17,82	18,83	18,56	15,46	10,31	6,28	2,01
10.....	2,30	4,47	7,78	13,02	15,89	18,69	19,75	19,65	16,82	11,49	6,92	2,57
11.....	3,03	5,36	8,96	14,17	16,85	19,71	20,76	20,72	18,07	12,61	7,60	3,16
12 (Midi).....	3,61	6,18	10,00	15,16	17,65	20,38	21,52	21,59	19,07	13,40	8,27	3,71
13.....	4,00	6,83	10,71	15,82	18,02	21,11	21,96	22,34	19,67	13,93	8,64	4,17
14.....	4,24	7,17	11,17	16,25	18,33	21,45	22,16	22,67	20,06	14,13	8,85	4,33
15.....	4,25	7,20	11,28	16,27	18,33	21,57	22,37	22,84	20,04	13,86	8,73	4,23
16.....	3,94	7,08	10,87	15,86	18,20	21,56	22,20	22,64	19,45	13,35	8,26	3,94
17.....	3,48	6,54	10,19	14,97	17,63	21,03	21,82	21,94	18,40	12,48	7,85	3,56
18.....	3,14	5,83	9,27	14,10	16,65	20,05	20,83	20,87	17,32	11,73	7,57	3,34
19.....	2,93	5,37	8,26	12,85	15,61	19,11	19,85	19,49	16,24	11,26	7,31	3,16
20.....	2,72	5,01	7,67	12,00	14,49	18,02	18,78	18,55	15,53	10,89	7,12	3,00
21.....	2,47	4,61	7,10	11,19	13,54	17,03	17,95	17,79	14,89	10,53	6,86	2,84
22.....	2,31	4,30	6,65	10,45	12,85	16,37	17,21	17,24	14,44	10,18	6,66	2,68
23.....	2,18	4,01	6,20	9,85	12,22	15,66	16,65	16,62	14,04	9,89	6,48	2,51

1890-1894. — *Température moyenne au Parc Saint-Maur.*

Heures.	Janvier.	Février.	Mars.	Avril.	Mai.	Juin.	Juillet.	Août.	Septembre.	Octobre.	Novembre.	Décembre.
0 (Minuit).....	0°,84	2°,60	4°,46	7°,90	10°,28	13°,51	14°,78	14°,77	12°,22	8°,49	5°,22	1°,01
1.....	0,72	2,36	4,14	7,43	9,86	12,99	14,32	14,29	11,85	8,33	5,04	0,87
2.....	0,62	2,26	3,77	6,80	9,40	12,56	13,89	13,79	11,40	8,09	4,89	0,76
3.....	0,52	2,07	3,45	6,24	9,01	12,14	13,45	13,37	10,99	7,79	4,76	0,65
4.....	0,43	1,96	3,17	5,85	8,69	11,66	13,13	13,03	10,69	7,65	4,68	0,59
5.....	0,40	1,84	2,95	5,53	8,79	12,16	13,27	12,89	10,50	7,54	4,64	0,50
6.....	0,30	1,73	2,81	5,87	9,90	13,37	14,34	13,55	10,47	7,38	4,57	0,47
7.....	0,27	1,66	3,22	7,42	11,58	14,97	15,86	15,17	11,55	7,56	4,59	0,41
8.....	0,37	2,00	4,64	9,45	13,36	16,42	17,37	17,00	13,53	8,57	4,86	0,42
9.....	0,82	3,02	6,27	11,36	14,73	17,78	18,77	18,70	15,74	10,04	5,66	0,91
10.....	1,67	4,21	7,64	12,82	15,72	18,72	19,86	19,98	17,41	11,42	6,50	1,80
11.....	2,56	5,30	8,78	14,01	16,66	19,53	20,70	20,79	18,29	12,52	7,40	2,67
12 (Midi).....	3,24	6,17	9,66	14,65	17,26	20,15	21,17	21,44	18,91	13,20	8,12	3,31
13.....	3,63	6,84	10,35	15,30	17,73	20,71	21,71	22,11	19,53	13,73	8,49	3,78
14.....	3,84	7,24	10,73	15,67	17,83	21,01	21,65	22,31	19,60	13,63	8,59	3,87
15.....	3,77	7,13	10,71	15,62	17,72	20,92	21,67	22,04	19,13	13,41	8,43	3,65
16.....	3,29	6,81	10,51	15,32	17,38	20,48	21,23	21,72	18,72	12,78	7,78	3,08
17.....	2,64	6,01	9,79	14,63	16,93	19,98	20,79	21,16	17,87	11,61	7,02	2,59
18.....	2,15	5,02	8,60	13,58	16,00	19,28	20,12	20,13	16,34	10,65	6,67	2,21
19.....	1,87	4,30	7,36	11,92	14,80	18,25	18,93	18,67	15,17	10,10	6,31	1,95
20.....	1,55	3,86	6,44	10,71	13,40	16,76	17,61	17,38	14,27	9,72	6,06	1,70
21.....	1,33	3,51	5,80	9,84	12,44	15,56	16,68	16,51	13,62	9,35	5,81	1,50
22.....	1,21	3,12	5,23	9,11	11,58	14,74	15,87	15,89	13,04	9,05	5,59	1,31
23.....	1,03	2,84	4,83	8,48	10,95	14,12	15,31	15,32	12,61	8,73	5,36	1,16

1890-1894. — *Température moyenne à la Tour Eiffel* (sommet).

Heures.	Janvier.	Février.	Mars.	Avril.	Mai.	Juin.	Juillet.	Août.	Septembre.	Octobre.	Novembre.	Décembre.
0 (Minuit).....	1°,15	2°,94	5°,12	8°,61	10°,81	13°,84	15°,07	15°,63	13°,79	9°,55	5°,27	1°,36
1.....	1,08	2,73	4,75	8,21	10,38	13,40	14,46	15,18	13,44	9,29	5,19	1,26
2.....	1,00	2,67	4,53	7,94	10,06	13,11	14,25	14,92	13,13	9,11	5,06	1,25
3.....	0,90	2,51	4,21	7,60	9,77	12,69	13,85	14,63	12,83	8,85	4,92	1,15
4.....	0,82	2,35	4,02	7,32	9,63	12,43	13,62	14,39	12,74	8,68	4,80	1,04
5.....	0,73	2,27	3,82	7,15	9,65	12,59	13,78	14,25	12,58	8,52	4,68	1,03
6.....	0,70	2,24	3,69	7,08	9,75	12,60	13,80	14,36	12,46	8,40	4,63	0,96
7.....	0,63	2,12	3,68	7,15	9,92	12,82	14,06	14,56	12,67	8,45	4,59	0,84
8.....	0,69	2,21	3,82	7,43	10,47	13,33	14,59	14,95	12,94	8,59	4,67	0,77
9.....	0,79	2,41	4,22	8,31	11,31	14,23	15,50	15,80	13,50	8,96	4,82	0,99
10.....	1,15	2,72	4,81	9,13	12,03	14,82	16,24	16,53	14,18	9,35	5,09	1,19
11.....	1,33	3,14	5,51	10,13	12,92	15,78	17,18	17,52	15,12	9,99	5,53	1,41
12 (Midi).....	1,55	3,60	6,24	10,86	13,54	16,38	17,72	18,25	15,72	10,52	5,72	1,75
13.....	1,68	4,01	6,90	11,60	13,99	17,00	18,17	18,82	16,33	11,01	5,98	1,97
14.....	1,87	4,26	7,40	12,07	14,25	17,38	18,38	19,13	16,60	11,14	6,13	2,16
15.....	1,92	4,40	7,55	12,19	14,40	17,60	18,59	19,38	16,79	11,17	6,11	2,11
16.....	1,81	4,38	7,55	12,11	14,42	17,61	18,55	19,28	16,64	11,05	5,96	1,97
17.....	1,73	4,12	7,26	11,92	14,17	17,35	18,36	18,96	16,20	10,69	5,87	1,81
18.....	1,65	3,93	6,85	11,54	13,72	16,95	18,00	18,41	15,78	10,53	5,83	1,76
19.....	1,54	3,79	6,36	10,91	13,22	16,48	17,51	17,69	15,36	10,43	5,71	1,73
20.....	1,58	3,65	6,13	10,52	12,53	15,74	16,83	17,31	15,06	10,28	5,64	1,74
21.....	1,42	3,47	5,84	9,95	12,08	15,25	16,33	16,81	14,76	10,02	5,55	1,73
22.....	1,33	3,29	5,50	9,57	11,64	14,83	16,03	16,40	14,48	9,85	5,51	1,60
23.....	1,22	3,05	5,34	9,06	11,21	14,27	15,42	15,92	14,18	9,64	5,40	1,49

1890-1891. — *Différences de température : Saint-Maur et Tour Eiffel* (sommet).

Heures.	Janvier.	Février.	Mars.	Avril.	Mai.	Juin.	Juillet.	Août.	Septembre.	Octobre.	Novembre.	Décembre.
0 (Minuit).....	—0,31	—0,34	—0,06	—0,71	—0,53	—0,33	—0,29	—0,86	—1,57	—1,06	—0,05	—0,35
1.....	—0,36	—0,37	—0,61	—0,78	—0,52	—0,41	—0,14	—0,89	—1,59	—0,96	—0,15	—0,39
2.....	—0,47	—0,41	—0,76	—1,14	—0,66	—0,55	—0,36	—1,13	—1,73	—1,02	—0,17	—0,49
3.....	—0,38	—0,44	—0,76	—1,36	—0,76	—0,55	—0,40	—1,26	—1,84	—1,06	—0,16	—0,50
4.....	—0,39	—0,39	—0,85	—1,47	—0,94	—0,77	—0,49	—1,36	—2,05	—1,03	—0,12	—0,45
5.....	—0,33	—0,43	—0,87	—1,62	—0,86	—0,43	—0,51	—1,36	—2,08	—1,02	—0,01	—0,53
6.....	—0,40	—0,51	—0,88	—1,21	+0,15	+0,77	+0,54	—0,81	—1,09	—1,02	—0,06	—0,49
7.....	—0,36	—0,46	—0,46	+0,27	1,66	2,15	1,80	+0,61	—1,12	—0,89	0,00	—0,43
8.....	—0,32	—0,21	+0,82	2,03	2,89	3,09	2,78	2,05	+0,59	—0,02	+0,19	—0,35
9.....	+0,03	+0,62	2,05	3,05	3,42	3,55	3,27	2,90	2,24	+1,08	0,84	—0,08
10.....	0,52	1,49	2,83	3,69	3,69	3,90	3,62	3,45	3,23	2,17	1,50	+0,61
11.....	1,23	2,16	3,27	3,88	3,74	3,75	3,52	3,27	3,17	2,53	1,87	1,26
12 (Midi).....	1,69	2,57	3,42	3,79	3,72	3,77	3,45	3,19	3,19	2,68	2,40	1,56
13.....	1,95	2,83	3,45	3,70	3,74	3,71	3,51	3,20	3,20	2,69	2,51	1,81
14.....	1,97	2,98	3,33	3,60	3,58	3,63	3,27	3,18	3,00	2,49	2,46	1,71
15.....	1,85	2,73	3,16	3,43	3,32	3,32	3,08	2,66	2,34	2,24	2,32	1,54
16.....	1,48	2,43	2,96	3,21	2,96	2,87	2,68	2,44	2,08	1,73	1,82	1,11
17.....	0,91	1,89	2,53	2,71	2,76	2,63	2,43	2,20	1,67	0,92	1,15	0,78
18.....	0,50	1,09	1,75	2,04	2,28	2,33	2,12	1,72	0,56	0,12	0,84	0,45
19.....	0,33	0,51	1,00	1,01	1,58	1,77	1,42	0,98	—0,19	—0,33	0,60	0,22
20.....	—0,05	0,21	0,31	0,19	0,87	1,02	0,78	0,07	—0,79	—0,56	0,42	—0,01
21.....	—0,09	0,01	—0,01	—0,11	0,36	0,31	0,35	—0,30	—1,14	—0,67	0,26	—0,23
22.....	—0,12	—0,17	—0,36	—0,46	—0,06	—0,09	—0,16	—0,51	—1,44	—0,80	0,08	—0,29
23.....	—0,19	—0,21	—0,51	—0,58	—0,26	—0,15	—0,11	—0,60	—1,54	—0,91	—0,04	—0,33

1890-1891. — *Différences de température : Bureau météorologique* (cour) *et Tour Eiffel* (sommet).

Heures.	Janvier.	Février.	Mars.	Avril.	Mai.	Juin.	Juillet.	Août.	Septembre.	Octobre.	Novembre.	Décembre.
0 (Minuit).....	0,91	0,90	0,71	0,74	0,99	1,26	1,11	0,52	—0,12	0,13	1,03	1,01
1.....	0,85	0,92	0,75	0,52	0,81	1,19	1,13	0,43	—0,13	0,20	0,99	0,89
2.....	0,74	0,83	0,64	0,30	0,74	1,07	0,95	0,34	—0,16	0,16	0,97	0,78
3.....	0,82	0,82	0,68	0,20	0,63	1,05	0,99	0,25	—0,21	0,15	0,96	0,77
4.....	0,77	0,84	0,62	0,12	0,47	0,98	0,96	0,24	—0,35	0,15	0,98	0,80
5.....	0,77	0,80	0,57	—0,05	0,38	0,83	0,72	0,16	—0,49	0,19	1,02	0,72
6.....	0,75	0,72	0,57	+0,07	0,86	1,83	1,19	0,26	—0,48	0,17	1,00	0,74
7.....	0,81	0,77	0,78	0,89	2,11	2,58	2,16	1,09	—0,13	0,17	1,03	0,83
8.....	0,85	0,83	1,47	2,39	3,12	3,20	2,96	2,20	+0,89	0,67	1,15	0,97
9.....	0,98	1,19	2,28	3,21	3,59	3,59	3,33	2,76	1,96	1,35	1,46	1,02
10.....	1,24	1,75	2,97	3,89	3,86	3,87	3,51	3,12	2,64	2,14	1,83	1,38
11.....	1,70	2,22	3,45	4,01	3,93	3,93	3,58	3,20	2,95	2,62	2,17	1,75
12 (Midi).....	2,06	2,58	3,76	4,30	4,11	4,00	3,80	3,34	3,35	2,88	2,55	1,96
13.....	2,32	2,82	3,81	4,22	4,03	4,11	3,79	3,52	3,34	2,89	2,66	2,20
14.....	2,37	2,91	3,77	4,18	4,08	4,07	3,78	3,54	3,46	2,99	2,72	2,17
15.....	2,33	2,89	3,73	4,08	3,93	3,97	3,78	3,46	3,25	2,69	2,62	2,12
16.....	2,13	2,70	3,32	3,75	3,78	3,95	3,65	3,36	2,81	2,30	2,30	1,97
17.....	1,75	2,42	2,93	3,05	3,46	3,68	3,46	2,98	2,20	1,79	1,98	1,75
18.....	1,49	1,90	2,42	2,56	2,93	3,10	2,83	2,46	1,54	1,29	1,74	1,58
19.....	1,39	1,58	1,90	1,94	2,39	2,63	2,34	1,80	0,88	0,83	1,60	1,43
20.....	1,14	1,36	1,54	1,48	1,96	2,28	1,95	1,24	0,47	0,61	1,48	1,26
21.....	1,05	1,14	1,26	1,24	1,46	1,78	1,62	0,98	0,13	0,51	1,31	1,11
22.....	0,98	1,01	1,06	0,88	1,21	1,54	1,18	0,84	—0,04	0,33	1,15	1,08
23.....	0,96	0,99	0,86	0,79	1,01	1,39	1,23	0,70	—0,14	0,25	1,08	1,02

« Au moyen des nombres qui figurent dans les tableaux précédents, il est facile de construire les courbes qui représentent la variation diurne de la température dans les diverses stations et de relever sur ces courbes les valeurs du minimum et du maximum absolus, valeurs qui diffèrent, du reste, très peu de celles qui correspondent aux heures les plus voisines; on obtient ainsi les points extrêmes de la courbe figurative de la variation diurne. Ces extrêmes sont donnés ci-dessous.

Minima et maxima de la variation diurne de la température.

	B. C. M. Cour.		Saint-Maur.		Tour Eiffel.					
					125m.		197m.		302m.	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Janvier.....	1,53	4,28	0,27	3,85	0,72	3,18	0,72	2,65	0,62	1,93
Février.....	2,88	7,29	1,66	7,25	2,17	6,09	2,26	5,48	2,12	4,42
Mars.....	4,24	11,30	2,80	10,74	3,63	9,30	3,73	8,63	3,67	7,57
Avril.....	7,04	16,30	5,53	15,68	6,70	13,85	6,80	12,19	7,07	12,19
Mai.....	10,03	18,35	8,60	17,83	9,68	16,08	9,60	15,23	9,62	14,44
Juin.....	13,36	21,59	11,62	21,03	12,82	19,30	12,70	18,56	12,43	17,64
Juillet.....	14,49	22,37	13,06	21,84	13,98	20,20	13,82	19,41	13,62	18,60
Août.....	14,38	22,85	12,88	22,33	14,04	20,98	14,29	20,23	14,24	19,39
Septembre.....	11,98	20,11	10,45	19,63	11,92	18,40	12,30	17,77	12,46	16,80
Octobre.....	8,53	14,14	7,36	13,69	8,24	12,77	8,51	12,17	8,40	11,18
Novembre.....	5,61	8,86	4,56	8,59	4,86	7,65	4,77	7,09	4,59	6,14
Décembre.....	1,67	4,33	0,40	3,87	0,88	3,21	0,80	2,84	0,77	2,17

« La différence du maximum et du minimum donne, pour chaque station, l'amplitude de la variation diurne périodique ; ces amplitudes sont les suivantes :

Amplitude de la variation diurne périodique de la température.

	B.C.M.Cour.	Saint-Maur.	Tour Eiffel. 123m.	Tour Eiffel. 197m.	Tour Eiffel. 302m.	B.C.M.Cour.	Saint-Maur.	Tour Eiffel. 123m.	Tour Eiffel. 197m.	Tour Eiffel. 302m.
Janvier.....	2,75	3,58	2,46	1,93	1,31	Juillet.....	7,88	8,78	6,22	5,59	4,98
Février.....	4,41	5,59	3,92	3,22	2,30	Août.....	8,17	9,45	6,91	5,94	5,15
Mars.....	7,06	7,94	5,67	4,90	3,90	Septembre.....	8,13	9,18	6,48	5,47	4,34
Avril.....	9,26	10,15	7,15	6,39	5,12	Octobre.....	5,61	6,33	4,53	3,66	2,78
Mai.....	8,32	9,13	6,40	5,63	4,82	Novembre.....	3,25	4,03	2,79	2,32	1,55
Juin.....	8,23	9,41	6,48	5,86	5,21	Décembre.....	2,66	3,47	2,33	2,04	1,40

« Les valeurs absolues des amplitudes peuvent varier beaucoup, pour un même mois, d'une année à l'autre, suivant l'état général de l'atmosphère. On ne peut donc pas les considérer comme suffisamment bien déterminées par cinq années seulement d'observations. Mais les rapports de ces amplitudes à celles d'une des stations pendant la même période sont certainement beaucoup moins variables que les amplitudes elles-mêmes. Nous avons donc calculé ces rapports en prenant comme point de comparaison la station de Saint-Maur ; nous les donnons ici avec deux décimales seulement, la troisième n'ayant évidemment dans le cas actuel aucune signification.

Rapport des amplitudes de la variation diurne de la température à celles du Parc Saint-Maur.

	B.C.M.Cour.	Tour Eiffel. 123m.	Tour Eiffel. 197m.	Tour Eiffel. 302m.	B.C.M.Cour.	Tour Eiffel. 123m.	Tour Eiffel. 197m.	Tour Eiffel. 302m.
Janvier.....	0,77	0,69	0,54	0,37	Juillet.....	0,90	0,71	0,64	0,57
Février.....	0,79	0,70	0,58	0,41	Août.....	0,90	0,73	0,63	0,55
Mars.....	0,89	0,71	0,62	0,49	Septembre.....	0,89	0,71	0,60	0,47
Avril.....	0,91	0,70	0,63	0,50	Octobre.....	0,89	0,72	0,58	0,44
Mai.....	0,91	0,70	0,62	0,53	Novembre.....	0,81	0,69	0,58	0,38
Juin.....	0,87	0,69	0,62	0,55	Décembre.....	0,77	0,67	0,59	0,40

« Le rapport des amplitudes de la température à Saint-Maur et dans la cour du Bureau météorologique est constant et égal à 0,90 dans les huit mois, de mars à octobre ; il est un peu plus faible (0,78) dans les quatre autres mois ; la cause de cette différence est dans les conditions particulières de l'installation de l'abri au Bureau.

« A la seconde plate-forme de la Tour Eiffel (123 *m*), le rapport des amplitudes de la température à celles de Saint-Maur reste presque constant pendant toute l'année, mais montre cependant une légère tendance à être plus grand en été qu'en hiver ; cette tendance s'accentue nettement à la plate-forme intermédiaire (197 *m*), et la variation annuelle du rapport devient très importante au sommet (302 *m*).

« L'amplitude de la variation diurne paraît, d'après les nombres rapportés ci-dessus, décroître suivant une loi plus rapide que l'altitude.

« Les tableaux de températures qui précèdent contiennent tous les renseignements nécessaires à l'étude de la variation diurne de la température aux différentes hauteurs. La comparaison des nombres de Saint-Maur et de ceux des trois stations de la Tour Eiffel montre que, dans tous les mois sans exception, l'inversion de température est la règle pendant la nuit dans les couches les plus basses de l'atmosphère. La loi de variation de la température, suivant la hauteur, est rendue plus évidente par les deux diagrammes de la page 260, établis respectivement : le premier, avec les températures moyennes des deux mois les plus froids, décembre et janvier ; le second, avec les moyennes des deux mois d'août et de septembre, qui sont ceux où l'inversion de température pendant la nuit est la plus accentuée et se manifeste jusqu'à la plus grande hauteur. Dans ces diagrammes, les heures sont portées en abscisses et les hauteurs en ordonnées ; les courbes, tracées de 0°,2 en 0°,2 (ou de 0°,5 en 0°,5 quand elles étaient trop serrées), indiquent ainsi la marche progressive des diverses isothermes, dans le temps et dans la hauteur. Dans le premier diagramme (décembre-janvier), on voit, par exemple, que la température de + 2° commence au niveau du sol à 10^h15^m ; elle gagne progressivement des régions de plus en plus hautes, arrive à 100 *m* à 10^h40^m, à 200 *m* à midi, à 300 *m* à 13^h55^m ; à 14^h30^m, elle est parvenue à 312 *m*, hauteur qu'elle ne dépasse pas ; on la retrouve encore à 300 *m* à 15^h25^m, à 200 *m* à 19^h25^m, à 100 *m* à 20^h45^m.

« Les points où ces lignes isothermes ont une tangente horizontale correspondent aux maxima ou aux minima de la température. Nous avons indiqué par deux courbes pointillées le lieu de ces points. On

voit ainsi qu'en décembre-janvier l'heure du minimum de la température se présente à 7^h25^m au niveau du sol, à 7^h45^m à 100 *m*, et qu'à partir de 200 *m* elle paraît invariable et égale à 7^h55^m. En août-septembre, le minimum arrive à 5 heures au niveau du sol, à 5^h30^m à 100 *m*, 5^h45^m à 200 *m* et 5^h55^m à 300^m. L'heure du maximum semble retarder d'abord jusqu'à une certaine hauteur, puis avancer ensuite à partir de ce point et se rapprocher de midi. Ainsi, en décembre-janvier, le maximum arrive à 13^h50^m au niveau du sol, à 14^h30^m à 100 *m*, à 14^h40^m à 200 *m* et à 14^h30^m à 300 *m* ; en août-septembre, le maximum s'observe à 14 heures au niveau du sol, à 15^h10^m à 100 *m*, à 15^h25^m à 200 *m* et à 15^h à 300 *m*.

« Les points où les lignes isothermes ont une tangente verticale indiquent les heures à partir desquelles se manifeste l'inversion de température dans les couches basses ; à partir de ces points, la température diminue à la fois quand on s'élève et quand on s'abaisse ; nous avons également représenté le lieu de ces points par deux courbes à traits interrompus. En décembre-janvier, l'inversion commence au niveau du sol à 16^h5^m : elle gagne 80 *m* à 17 heures, 100 *m* à 18 heures, et s'élève jusqu'à 125 *m* entre minuit et 1 heure ; puis, la couche où il y a inversion de température diminue progressivement de hauteur ; elle n'a plus que

Décembre-janvier.

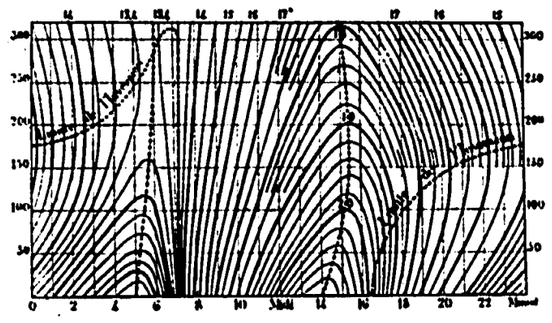


Fig. 200.

Août-septembre.

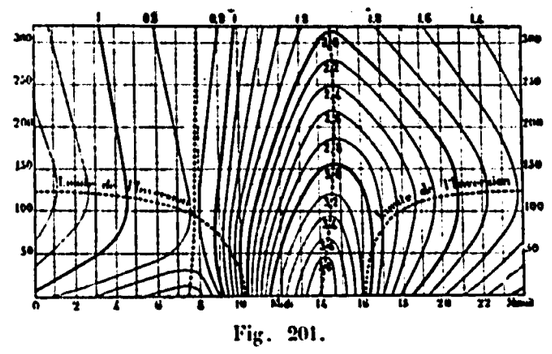


Fig. 201.

100 *m* à 7^h10^m, 50 *m* à 9^h35^m et s'annule à 10^h20^m ; entre 10^h20^m et 16^h5^m, la température va donc constamment en décroissant quand on s'élève dans l'air. En août-septembre, l'inversion commence au sol à 16^h25^m et se termine à 7^h5^m, mais elle s'étend beaucoup plus haut dans l'atmosphère ; il y a inversion jusqu'à 200 *m* à 3^h10^m et jusqu'à plus de 300 *m* entre 6^h10^m et 7^h5^m. Le manque d'observations ne permet pas de prolonger les isothermes au-dessus de 300 *m*, de sorte que la limite supérieure de l'inversion n'est pas nettement déterminée ; mais, d'après l'allure générale des courbes, elle ne paraît pas dépasser notablement 310 *m*. On pourrait étudier de même les autres époques de l'année ; nous nous bornerons aux deux précédentes, qui nous ont paru les plus intéressantes.

II. — Humidité atmosphérique.

« Les observations d'humidité atmosphérique ont été faites, au sommet de la Tour Eiffel, à 302 *m* au-dessus du sol, au moyen d'un hygromètre enregistreur Richard à faisceau de cheveux, dont les indications ont été contrôlées quatre ou cinq fois par semaine au moyen de celles d'un psychromètre placé à côté. On obtient ainsi directement, toutes corrections instrumentales faites, les valeurs horaires de l'humidité relative ; l'humidité relative et la température combinées donnent ensuite les valeurs horaires de la tension de vapeur.

« 1° *Variation diurne de l'humidité.* — Les observations hygrométriques de la Tour Eiffel ont été comparées avec celles du Parc Saint-Maur.

« Cette comparaison montre que la variation diurne de la tension de la vapeur d'eau suit une marche toute différente à la Tour Eiffel et près du sol. Dans les quatre mois de novembre, décembre, janvier et février, la tension de vapeur est sensiblement constante pendant toute la journée à la Tour Eiffel ; l'amplitude de la variation diurne est en effet, surtout en décembre et janvier, tout à fait du même ordre de grandeur que l'erreur probable de moyennes résultant de cinq années d'observations seulement. Pendant les autres mois, la tension de la vapeur ne présente, dans les vingt-quatre heures, qu'un seul maximum et un seul minimum bien nets : le maximum se produit le matin, vers 9 heures, et le minimum le soir, vers 16 heures ou 17 heures, c'est-à-dire à peu près aux mêmes heures que le maximum et le minimum correspondants au niveau du sol ; mais le second maximum et le second minimum qu'on observe respectivement le soir et vers le lever du soleil dans les couches basses disparaissent d'une manière à peu près complète à 300 *m* de hauteur.

« Quant à l'humidité relative (1), elle a sensiblement la même valeur au Parc Saint-Maur et à la Tour Eiffel, au milieu de la journée, au moment du minimum ; au contraire, le matin, au moment du maximum, l'humidité est beaucoup plus grande près du sol qu'à l'altitude de 300 *m*, ce qui est tout à fait d'accord avec la loi de variation de la température et l'inversion qui se produit normalement dans les couches basses.

« Pour terminer ces considérations relatives à la variation diurne de l'humidité, nous donnons ci-dessous, pour les deux stations, l'amplitude de la variation de la tension de vapeur et de l'humidité relative ; ces nombres ont été obtenus simplement en faisant la différence de la plus grande et de la plus petite des valeurs horaires données pour chaque mois dans les Tableaux précédents.

Amplitude de la variation diurne de l'humidité.

	Tension de vapeur.		Humidité relative.			Tension de vapeur.		Humidité relative.	
	Tour Eiffel.	Saint-Maur.	Tour Eiffel	Saint-Maur.		Tour Eiffel.	Saint-Maur.	Tour Eiffel.	Saint-Maur.
	mm	*mm*				*mm*	*mm*		
Janvier.....	0,20	0,32	8,2	14,8	Juillet.....	0,61	0,76	23,6	35,2
Février.....	0,13	0,33	10,4	23,8	Août.....	0,76	0,92	23,6	39,6
Mars.....	0,28	0,41	19,7	35,1	Septembre.....	0,57	1,15	20,1	36,9
Avril.....	0,58	0,86	23,9	42,0	Octobre	0,37	0,79	13,2	26,2
Mai.....	0,62	0,56	22,1	37,9	Novembre.....	0,19	0,48	7,1	16,7
Juin	0,56	0,68	23,1	38,7	Décembre.....	0,24	0,34	5,6	14,5

« Les amplitudes sont beaucoup plus faibles, en général, à 300 *m* que près du sol, aussi bien pour la tension de vapeur que pour l'humidité relative ; il n'y a d'exception qu'en mars et pour la tension de vapeur seulement ; l'examen des nombres, qui sont un peu irréguliers pour ce mois, montre que cette exception disparaîtrait dans une période d'observation plus longue.

« 2° *Variation annuelle de l'humidité.* — Nous donnons ci-dessous, pour les deux stations, les moyennes mensuelles de la tension de vapeur et de l'humidité relative, déduites des cinq années 1890-1894.

1890-1894. — *Moyennes mensuelles de l'humidité.*

	Tension de vapeur.		Humidité relative.			Tension de vapeur.		Humidité relative.	
	Tour Eiffel.	Saint-Maur.	Tour Eiffel.	Saint-Maur.		Tour Eiffel.	Saint-Maur.	Tour Eiffel.	Saint-Maur.
	mm	*mm*				*mm*	*mm*		
Janvier.....	4,34	4,67	81,3	85,1	Juillet.....	8,95	10,82	67,0	73,9
Février.....	4,47	4,92	75,7	79,8	Août.....	9,17	10,93	66,1	74,6
Mars.....	4,56	5,15	67,1	71,1	Septembre.....	8,11	9,81	66,5	79,2
Avril.....	5,13	5,87	59,8	63,7	Octobre	6,70	7,89	73,1	81,1
Mai.....	6,11	7,71	63,1	68,9	Novembre	5,77	6,11	82,6	87,2
Juin	8,02	9,71	61,5	70,7	Décembre.....	4,35	4,77	81,1	87,6
					Année....	6,33	7,39	70,7	77,2

« La tension de la vapeur est plus faible dans tous les mois à la Tour Eiffel qu'à Saint-Maur, et cela est vrai non seulement pour les moyennes générales de la période, mais individuellement pour chacun des mois des cinq années. La différence entre les deux stations est la plus petite en hiver (janvier, 0,33 *mm*) et la plus grande en été (juillet, 1,87 *mm*). Les deux mois extrêmes sont les mêmes aux deux stations, janvier pour le minimum, août pour le maximum ; les différences entre les moyennes des tensions de vapeur de ces deux mois sont respectivement 4,83 *mm* à la Tour Eiffel et 6,26 *mm* au Parc Saint-Maur. L'amplitude de la variation annuelle de la tension de vapeur diminue donc rapidement avec l'altitude.

« L'humidité relative est aussi, dans tous les mois, plus faible à 300 *m* que près du sol. La différence provient exclusivement de la nuit, comme nous l'avons indiqué dans l'étude de la variation diurne. Mais, contrairement à ce que nous avons trouvé pour la température et la tension de vapeur, l'amplitude de la variation annuelle de l'humidité relative est sensiblement la même dans les deux stations, 23,9 à Saint-Maur, 22,8 à la Tour Eiffel. Le mois le plus sec est le même des deux côtés, avril ; le mois le plus humide est novembre à la Tour et décembre à Saint-Maur ; mais, comme l'humidité relative varie très peu de novembre à janvier, peut-être le mois le plus humide ne resterait-il plus le même dans une série plus longue. Malgré cette analogie de marche, la différence entre les deux stations est loin d'être constante : elle est minimum en avril (3,9) et

(1) Quotient de la tension de la vapeur d'eau qui existe actuellement dans l'atmosphère par la tension maximum correspondant à la température observée au même moment.

prend des valeurs considérables à la fin de la saison chaude : 8,2 en août, 11,3 en octobre et 12,7 en septembre. Ces variations sont absolument concordantes avec celles de la température; c'est à ce moment, en effet, que la différence de température entre les deux stations est la plus petite, et qu'il arrive même que la station supérieure puisse être la plus chaude en valeur absolue; comme en même temps la tension de vapeur y est moindre, l'humidité relative peut devenir alors beaucoup plus petite que près du sol.

III. — Vitesse du vent.

« 1° *Variation diurne.* — Les tableaux suivants donnent les moyennes horaires de la vitesse du vent, par mois, pour la période de six années, 1890-1895, au Bureau météorologique et à la Tour Eiffel. On y a ajouté, pour faciliter l'étude, les valeurs du rapport et de la différence des vitesses observées à chaque heure dans les deux stations (1).

1890-1895. — *Moyennes horaires de la vitesse du vent au Bureau météorologique*

Heures.	Janvier.	Février.	Mars.	Avril.	Mai.	Juin.	Juillet.	Août.	Septembre.	Octobre.	Novembre.	Décembre.
	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
0 (Minuit).....	2,20	2,31	1,98	1,63	1,42	1,45	1,51	1,44	1,22	1,51	2,09	2,19
1.....	2,14	2,27	1,97	1,62	1,38	1,47	1,42	1,37	1,16	1,49	1,97	2,11
2.....	2,14	2,28	1,87	1,46	1,32	1,42	1,33	1,36	1,11	1,47	2,00	2,10
3.....	2,15	2,27	1,94	1,39	1,35	1,20	1,27	1,39	1,05	1,48	1,96	2,11
4.....	2,22	2,30	1,83	1,42	1,33	1,25	1,42	1,33	1,01	1,37	1,93	1,99
5.....	2,23	2,26	1,85	1,54	1,32	1,33	1,46	1,29	1,00	1,49	1,81	2,10
6.....	2,23	2,19	1,93	1,53	1,40	1,55	1,60	1,34	1,08	1,45	1,93	2,02
7.....	2,24	2,21	1,92	1,84	1,77	1,94	1,85	1,61	1,19	1,58	1,94	1,98
8.....	2,29	2,26	2,29	2,14	2,05	2,16	2,10	1,93	1,47	1,76	1,97	2,09
9.....	2,31	2,43	2,63	2,42	2,33	2,26	2,32	2,26	1,76	2,09	2,16	2,13
10.....	2,52	2,72	2,91	2,69	2,63	2,53	2,62	2,57	2,08	2,35	2,36	2,50
11.....	2,68	2,83	3,12	2,82	2,87	2,71	2,79	2,75	2,49	2,55	2,42	2,55
12 (Midi).....	2,84	2,93	3,31	2,90	2,88	2,65	2,90	2,76	2,56	2,79	2,58	2,74
13.....	2,89	3,10	3,37	2,89	2,90	2,72	2,97	2,90	2,57	2,71	2,64	2,73
14.....	2,96	3,13	3,42	2,88	2,95	2,70	3,04	2,92	2,48	2,65	2,61	2,74
15.....	2,76	2,99	3,32	2,83	2,89	2,67	2,85	2,78	2,42	2,59	2,39	2,61
16.....	2,56	2,91	3,31	2,74	2,85	2,83	2,78	2,74	2,43	2,31	2,15	2,48
17.....	2,34	2,75	3,00	2,79	2,81	2,78	2,71	2,60	2,21	2,01	2,12	2,36
18.....	2,31	2,52	2,59	2,53	2,63	2,59	2,35	2,14	1,78	1,80	2,16	2,47
19.....	2,24	2,50	2,31	2,12	2,21	2,30	2,10	1,82	1,53	1,77	2,20	2,35
20.....	2,27	2,46	2,22	2,12	1,89	1,87	1,74	1,70	1,46	1,64	2,17	2,40
21.....	2,25	2,45	2,20	1,98	1,76	1,71	1,67	1,69	1,30	1,67	2,10	2,38
22.....	2,19	2,38	2,04	1,79	1,66	1,66	1,55	1,68	1,25	1,56	1,98	2,29
23.....	2,22	2,32	2,01	1,69	1,48	1,60	1,60	1,48	1,22	1,55	1,96	2,22

1890-1895. — *Moyennes horaires de la vitesse du vent à la Tour Eiffel.*

Heures.	Janvier.	Février.	Mars.	Avril.	Mai.	Juin.	Juillet.	Août.	Septembre.	Octobre.	Novembre.	Décembre.
	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
0 (Minuit).....	10,96	10,61	10,55	9,72	8,95	8,74	9,23	9,39	8,84	10,35	10,13	9,69
1.....	10,80	10,72	10,27	9,47	8,96	8,61	9,03	9,07	8,64	10,13	10,13	9,60
2.....	10,76	10,61	10,26	9,35	8,64	8,52	9,09	9,12	8,44	10,05	10,17	9,59
3.....	10,76	10,70	10,32	8,94	8,77	8,21	8,70	9,01	8,32	9,99	10,24	9,72
4.....	10,76	10,71	10,13	8,81	8,68	7,94	8,70	8,77	8,13	9,83	9,96	9,49
5.....	10,82	10,67	10,12	8,71	8,45	7,88	8,63	8,60	7,98	9,72	9,76	9,55
6.....	10,93	10,39	10,03	8,53	7,95	7,37	8,08	8,51	7,89	9,98	9,72	9,65
7.....	10,88	10,39	9,83	7,91	7,05	6,51	7,16	7,69	7,59	9,97	9,67	9,71
8.....	10,88	10,29	9,36	6,76	6,20	5,72	6,30	6,60	6,98	9,53	9,52	9,51
9.....	10,72	9,75	8,39	6,10	6,04	5,58	6,11	6,08	6,02	9,05	9,43	9,48
10.....	10,27	9,09	7,86	6,15	6,54	5,92	6,48	6,38	5,61	8,33	8,77	9,30
11.....	9,92	8,47	7,53	6,55	6,84	6,09	6,82	6,79	5,76	7,81	8,34	8,78
12 (Midi).....	9,54	8,02	7,71	6,85	7,14	6,24	6,22	6,91	6,02	7,86	7,80	8,32
13.....	9,11	7,72	7,97	6,99	7,17	6,25	7,28	7,11	6,17	7,94	7,90	8,24
14.....	8,93	7,96	8,05	6,82	7,28	6,58	7,66	7,33	6,25	7,89	7,77	8,24
15.....	9,18	7,80	8,35	7,01	7,48	6,81	7,26	7,32	6,39	8,16	7,95	8,22
16.....	9,41	8,24	8,75	7,34	7,81	6,99	7,58	7,38	6,55	8,27	8,40	8,66
17.....	10,01	8,72	8,84	7,39	7,82	7,25	7,71	7,59	6,83	8,84	9,21	9,11
18.....	10,55	9,52	9,08	7,66	8,08	7,22	7,67	8,07	7,31	9,77	9,69	9,59
19.....	10,65	10,16	9,80	8,36	8,22	7,30	7,80	8,40	8,19	10,21	10,10	9,91
20.....	10,89	10,43	10,07	9,35	8,57	7,88	7,98	9,15	8,59	10,42	10,29	10,05
21.....	10,96	10,56	10,36	9,68	8,92	8,35	8,80	9,59	8,78	10,52	10,34	10,11
22.....	10,87	10,92	10,43	9,79	9,16	8,82	9,05	8,65	9,06	10,38	10,27	9,88
23.....	10,97	10,83	10,35	9,92	9,31	9,03	9,29	9,55	8,98	10,33	10,09	9,80

(1) Il manque cinq jours en janvier 1890 et trois jours en décembre 1893.

1890-1895. — *Rapport des vitesses du vent à la Tour Eiffel et au Bureau météorologique.*

Heures.	Janvier.	Février.	Mars.	Avril.	Mai.	Juin.	Juillet.	Août.	Septembre.	Octobre.	Novembre.	Décembre.
0 (Minuit).....	5,0	4,6	5,3	6,0	6,3	6,0	6,1	6,5	7,2	6,9	4,8	4,4
1.....	5,0	4,7	5,2	5,8	6,5	5,9	6,4	6,6	7,4	6,8	5,1	4,5
2.....	5,0	4,7	5,5	6,4	6,5	6,0	6,8	6,7	7,6	6,8	5,1	4,6
3.....	5,0	4,7	5,3	6,4	6,5	6,4	6,8	6,5	7,9	6,8	5,2	4,6
4.....	4,8	4,7	5,5	6,2	6,5	6,4	6,1	6,6	8,0	7,2	5,2	4,8
5.....	4,9	4,7	5,5	5,7	6,4	5,9	5,9	6,7	8,0	6,5	5,4	4,5
6.....	4,9	4,7	5,2	5,6	5,7	4,8	5,1	6,4	7,3	6,9	5,0	4,8
7.....	4,9	4,7	5,1	4,3	4,0	3,4	3,9	4,8	6,4	6,3	5,0	4,9
8.....	4,8	4,6	4,1	3,2	3,0	2,6	3,0	3,4	4,7	5,4	4,8	4,6
9.....	4,6	4,0	3,2	2,5	2,6	2,5	2,6	2,7	3,4	4,3	4,4	4,5
10.....	4,1	3,3	2,7	2,3	2,5	2,3	2,5	2,5	2,7	3,5	3,7	3,7
11.....	3,7	3,0	2,4	2,3	2,4	2,2	2,4	2,5	2,3	3,1	3,4	3,4
12 (Midi).....	3,4	2,7	2,3	2,4	2,5	2,4	2,5	2,5	2,4	2,8	3,1	3,0
13.....	3,2	2,5	2,4	2,4	2,5	2,3	2,5	2,5	2,4	2,9	3,0	3,0
14.....	3,0	2,5	2,4	2,4	2,5	2,3	2,5	2,5	2,5	3,0	3,0	3,0
15.....	3,3	2,6	2,5	2,5	2,6	2,6	2,5	2,6	2,6	3,2	3,3	3,1
16.....	3,7	2,8	2,6	2,7	2,7	2,5	2,7	2,7	2,7	3,6	3,9	3,5
17.....	4,3	3,2	2,9	2,6	2,8	2,6	2,8	2,9	3,1	4,4	4,3	3,9
18.....	4,6	3,8	3,5	3,0	3,1	2,8	3,3	3,3	4,1	5,4	4,5	3,9
19.....	4,8	4,1	4,2	3,9	3,7	3,2	3,7	4,6	5,4	5,8	4,6	4,2
20.....	4,8	4,2	4,5	4,4	4,5	4,2	4,6	5,4	5,9	6,4	4,7	4,2
21.....	4,9	4,3	4,7	4,7	5,1	4,9	5,3	5,7	6,8	6,3	4,9	4,2
22.....	5,0	4,6	5,1	5,5	5,5	5,3	5,8	5,7	7,2	6,7	5,2	4,3
23.....	4,9	4,7	5,1	5,9	6,3	5,6	5,8	6,5	7,4	6,7	5,1	4,4

« Le tableau ci-dessus donne, pour tous les mois et chaque heure, le rapport des vitesses du vent à la Tour Eiffel et au Bureau météorologique. Ce rapport suit une marche diurne très régulière. Le rapport des deux vitesses est maximum vers la fin de la nuit et minimum au milieu de la journée. Il présente la plus grande variation en été et surtout en automne. En septembre, en particulier, ce rapport varie de 2,3 (11 heures) à 8,0 (4 et 5 heures); ce dernier nombre 8,0 est la plus grande valeur moyenne du rapport des vitesses du vent dans les deux stations à une heure et dans un mois quelconques.

« 2° *Variation annuelle.* — Nous donnons dans les tableaux suivants les moyennes mensuelles de la vitesse dans les deux stations pour tous les mois où des observations régulières ont été faites.

Vitesse moyenne du vent au Bureau météorologique.

	Janvier.	Février.	Mars.	Avril.	Mai.	Juin.	Juillet.	Août.	Septembre.	Octobre.	Novembre.	Décembre.	Année.
	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
1890.....	2,52	2,18	2,22	2,31	1,82	1,64	1,75	1,95	1,30	1,57	2,21	2,20	1,97
1891.....	2,55	1,45	2,86	2,44	2,01	2,01	2,17	2,57	1,83	2,35	2,11	3,00	2,28
1892.....	2,37	2,51	3,10	2,35	2,23	2,40	2,32	1,60	1,48	1,93	1,32	2,10	2,14
1893.....	1,84	2,89	1,61	1,90	1,96	2,27	2,15	1,91	2,18	1,59	2,73	2,19	2,10
1894.....	2,83	2,93	2,55	1,68	2,28	2,24	1,92	2,02	1,81	1,99	2,01	2,00	2,19
1895.....	2,18	2,88	2,48	2,28	2,19	1,80	2,17	1,99	1,37	1,99	2,49	2,43	2,19
1890-95.....	2,38	2,47	2,48	2,16	2,09	2,06	2,08	2,01	1,66	1,90	2,15	2,32	2,15

Vitesse moyenne du vent à la Tour Eiffel.

	Janvier.	Février.	Mars.	Avril.	Mai.	Juin.	Juillet.	Août.	Septembre.	Octobre.	Novembre.	Décembre.	Année.
	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
1890.....	11,53	10,29	9,45	9,70	8,51	7,58	8,06	8,78	6,61	8,45	9,83	6,63	8,83
1891.....	10,98	5,88	10,48	8,10	8,31	6,69	7,24	9,07	7,28	11,02	8,64	10,04	8,64
1892.....	9,47	10,14	9,54	7,97	7,80	7,58	7,87	7,30	7,84	10,50	6,36	9,18	8,46
1893.....	8,72	12,61	8,03	7,93	7,57	7,70	7,64	7,32	8,74	8,45	10,48	9,94 (1)	8,76
1894.....	12,47	10,62	9,63	7,28	8,15	8,09	7,68	8,23	7,83	8,62	9,47	9,70	8,98
1895.....	9,68	8,79	8,95	7,56	7,16	6,35	8,33	7,82	6,52	9,28	11,68	10,56	8,56
1890-95.....	10,48	9,72	9,35	8,09	7,92	7,33	7,90	8,09	7,47	9,39	9,41	9,34	8,71

Rapport moyen des vitesses du vent à la Tour Eiffel et au Bureau météorologique.

	Janvier.	Février.	Mars.	Avril.	Mai.	Juin.	Juillet.	Août.	Septembre.	Octobre	Novembre.	Décembre.	Année.
1890-95.....	4,40	3,94	3,77	3,75	3,79	3,56	3,80	4,02	4,50	4,94	4,38	4,03	4,05

« La variation annuelle de la vitesse du vent au Bureau météorologique ne présente pas d'allure très nette : il y a un petit minimum en août, septembre et octobre, et un maximum en février et mars. Cette absence

(1) Moyenne de 28 jours.

Les journées d'observations qui manquent pour ces trois mois n'ont présenté aucun caractère remarquable, et par suite leur omission ne saurait altérer la moyenne du mois d'une manière notable.

de régularité dans la variation annuelle provient de ce que, par suite des remous locaux produits par l'action solaire, la vitesse moyenne du vent se trouve augmentée d'une manière anormale pendant la saison chaude au milieu de la journée. De la sorte, la moyenne mensuelle se trouve trop forte par suite de causes accidentelles qui n'ont aucun rapport avec la circulation générale. Si l'on considère, au lieu de la moyenne du mois, la moyenne correspondant à la nuit seulement, époque à laquelle ces remous locaux n'existent pas, on trouve que la vitesse du vent est, au contraire, beaucoup plus grande en hiver qu'en été, ce qui est d'accord avec les lois connues de la circulation générale. La vitesse moyenne du vent au Bureau météorologique, de minuit à 4 heures du matin, a, en effet, la valeur suivante dans les différents mois :

	m		*m*		*m*
Janvier.....	2,16	Mai.....	1,35	Septembre.....	1,11
Février.....	2,28	Juin	1,38	Octobre.....	1,47
Mars.....	1,92	Juillet.....	1,38	Novembre.....	1,98
Avril.....	1,50	Août.....	1,38	Décembre.....	2,10

« La variation annuelle devient extrêmement nette sur ces nombres : il y a un maximum à la fin de l'hiver (février), et un minimum à la fin de l'été (septembre), la valeur du minimum étant moins de la moitié de celle du maximum.

« A la Tour Eiffel, où l'importance relative de la variation diurne est moindre, la variation annuelle ressort immédiatement de l'examen des moyennes mensuelles. Le minimum se produit en été et le maximum au milieu de l'hiver.

« La vitesse moyenne du vent est presque exactement quatre fois (4,05) plus grande à la Tour Eiffel qu'au Bureau météorologique ; ce rapport varie notablement dans le cours de l'année ; il est le plus petit en juin et le plus grand en octobre. Il suffit, à Paris, de s'élever de moins de 300 *m* au-dessus du sol pour que la vitesse moyenne du vent passe de 2,15 *m* à 8,71 *m* ; il y a donc d'abord, dans les couches les plus voisines du sol, une augmentation très rapide de la vitesse du vent avec la hauteur. Les observations faites sur les nuages montrent que cette augmentation est ensuite beaucoup plus lente. Pour déterminer la véritable loi d'accroissement de la vitesse avec la hauteur, il ne faut donc tenir aucun compte des observations faites très près du sol, qui appartiennent à une couche dans un état tout particulier et où la vitesse se trouve réduite artificiellement par le frottement. La vitesse des nuages ne peut être utilement comparée qu'à celle que l'on observe à des hauteurs d'au moins 100 *m* ou 200 *m* au-dessus du sol.

« 3° *Fréquence des différentes vitesses du vent.* — Dans beaucoup d'applications, notamment celles qui concernent l'Aéronautique, on a grand intérêt à connaître le degré de fréquence des différentes vitesses du vent ; les observations faites dans le voisinage immédiat du sol seraient, à cet égard, très trompeuses, car les observations comparatives à la Tour Eiffel et au Bureau météorologique montrent qu'il y a souvent un vent très appréciable et même fort à 300 *m* de hauteur, alors qu'il fait à peu près calme en bas. Nous avons donc, au moyen des observations faites pendant les six années 1890-1895, calculé la fréquence des différentes vitesses du vent à 300 *m* au-dessus du sol. Les résultats de ce dépouillement sont indiqués dans les tableaux suivants :

TOUR EIFFEL. — *Fréquence (pour 1.000) des vitesses de vent comprises entre :*

	0 *m* et 2 *m*	2 *m* et 4 *m*	4 *m* et 6 *m*	6 *m* et 8 *m*	8 *m* et 10 *m*	10 *m* et 12 *m*	12 *m* et 14 *m*	14 *m* et 16 *m*	16 *m* et 18 *m*	18 *m* et 20 *m*	20 *m* et 25 *m*	Au-dessus de 25 *m*
Janvier.....	43	67	105	120	131	136	136	109	71	43	35	4
Février.....	48	84	116	133	148	138	125	99	59	25	24	1
Mars.....	46	77	131	152	155	153	121	77	45	26	15	2
Avril	49	100	175	180	181	138	91	55	22	5	4	»
Mai	48	100	184	195	179	137	88	45	15	5	4	»
Juin	54	125	201	213	175	119	66	32	10	3	2	»
Juillet.....	56	100	164	214	182	130	80	41	21	5	4	»
Août	57	93	160	188	183	154	88	46	22	5	4	»
Septembre..	70	126	191	190	160	111	76	49	21	5	1	»
Octobre....	41	101	124	144	138	138	119	92	52	26	21	1
Novembre..	69	89	128	138	134	124	119	89	51	31	22	6
Décembre..	67	111	128	129	125	123	110	80	56	32	34	5

Tour Eiffel. — *Fréquence (pour 1.000) des vitesses de vent supérieures à :*

	2 m.	4 m.	6 m.	8 m.	10 m.	12 m.	14 m.	16 m.	18 m.	20 m.	25 m.
Janvier.....	957	890	785	665	534	398	262	153	82	39	4
Février.....	952	868	752	619	471	333	208	109	50	25	1
Mars.....	954	877	746	594	439	286	165	88	43	17	2
Avril.....	951	851	676	496	315	177	86	31	9	4	»
Mai.....	952	852	668	473	294	157	69	24	9	4	»
Juin.....	946	821	620	407	232	113	47	15	5	2	»
Juillet.....	944	844	680	466	284	154	74	33	9	4	»
Août.....	943	850	690	502	319	165	77	31	9	4	»
Septembre.....	930	804	613	423	263	152	76	27	6	1	»
Octobre.....	956	855	731	587	449	311	192	100	48	22	1
Novembre.....	931	842	714	576	440	316	197	108	57	28	6
Décembre.....	933	822	694	565	440	317	207	127	71	39	5

« Le premier tableau donne la fréquence relative, pour 1.000 observations, des vitesses comprises entre 0 *m* et 2 *m*, 2 *m* et 4 *m*, etc.; le second indique combien, sur un total de 1.000 observations, il y en a qui donnent des vitesses supérieures respectivement à 2 *m*, 4 *m*, 6 *m*, etc. Ces deux tableaux, qui se déduisent l'un de l'autre, pourront être utiles à consulter dans bien des cas pour les applications.

« La fréquence des vents forts, supérieurs à 10 *m* par seconde, est la plus grande en janvier; elle diminue régulièrement jusqu'en juin, où elle est minimum, augmente en juillet et août, puis, après avoir diminué un peu en septembre, augmente de nouveau jusqu'à la fin de l'année.

« Les vents de tempête, dépassant 25 *m* par seconde, sont relativement rares; on ne les observe en moyenne que 19 fois sur 1.000 et exclusivement dans les six mois d'octobre à mars. Mais il importe de remarquer que toutes ces vitesses ont été déterminées au moyen de l'anémo-cinémographe ordinaire de MM. Richard frères, qui envoie à l'appareil enregistreur un contact toutes les fois que le vent a parcouru un chemin de 25 *m*. Cet instrument ne donne pas ainsi rigoureusement la vitesse en mètres par seconde à un instant donné, mais seulement une moyenne correspondant à un intervalle de temps de quelques minutes. De plus, tous les nombres précédents ont été obtenus sur le dépouillement des vitesses du vent relevées à chaque heure exacte, sans tenir compte de ce qui s'est produit dans les périodes intermédiaires. Il est clair que la proportion des vents très forts serait notablement accrue, d'une part si l'on avait employé un instrument à indications instantanées, et de l'autre si, au lieu de prendre la vitesse du vent à chaque heure ronde, on avait relevé les plus grandes vitesses notées dans l'intervalle des heures d'observation.

« Pour compléter les données relatives aux vents de tempête, nous indiquons ici, pour chaque mois, le nombre de jours où le vent, à un moment quelconque, a dépassé respectivement 20 *m* et 25 *m* par seconde Nous rappellerons que la période de six ans considérée comprend en tout 186 jours dans chacun des mois de 31 jours, 180 jours dans les mois de 30 jours et 169 jours en février.

Nombre de jours où la vitesse du vent a dépassé 20 m.

Janvier.....	56	Mai.....	13	Septembre.....	7
Février.....	35	Juin.....	7	Octobre.....	37
Mars.....	31	Juillet.....	12	Novembre.....	34
Avril.....	11	Août.....	12	Décembre.....	35

Total..... 289 pour 2.191 jours d'observations.

Nombre de jours où la vitesse du vent a dépassé 25 m.

Janvier.....	14	Mai.....	2	Septembre.....	0
Février.....	7	Juin.....	0	Octobre.....	5
Mars.....	5	Juillet.....	2	Novembre.....	9
Avril.....	2	Août.....	2	Décembre.....	10

Total..... 58 pour 2.191 jours d'observations.

« Ces nombres seraient un peu plus élevés s'ils avaient été relevés sur un instrument donnant des indications instantanées. Un anémo-cinémographe à vitesses absolues est en service régulier à la Tour Eiffel; il envoie un contact à l'appareil enregistreur pour chaque mètre parcouru par le vent et les indications s'inscrivent sur une bande de papier qui se déroule à raison de 0,5 *mm* par seconde. Malheureusement, cet instrument, assez délicat, n'a jamais pu fonctionner d'une façon continue pendant les tempêtes de quelque durée. La vitesse la plus

grande qu'il ait enregistrée jusqu'ici est celle de 48 *m*, le 12 novembre 1894, à 18ʰ13ᵐ, alors que le cinémographe ordinaire indiquait une vitesse de 42 *m* comme moyenne de quelques minutes. A ce moment, le cinémographe à indications instantanées a cessé de fonctionner régulièrement, n'envoyant plus ses contacts que par intermittences. Quelques minutes plus tard, 18ʰ18ᵐ, on pointait au chronographe un intervalle de 2ˢ,2 pendant lequel le vent parcourait exactement 100 *m*, ce qui fait, pendant cet intervalle, une vitesse moyenne de 45,5 *m* par seconde; il paraît vraisemblable que la vitesse instantanée des coups de vent atteignait alors et dépassait peut-être 50 *m* par seconde.

IV. — Direction du vent.

« La direction du vent à la Tour Eiffel est enregistrée au moyen d'une girouette Richard, à transmission électrique, qui fonctionne par échelons successifs correspondant chacun à $\frac{1}{128}$ de circonférence; le manque de transmission d'un contact introduit donc une erreur constante de cet ordre dans l'enregistrement. Pour éviter et corriger ces erreurs, qui peuvent s'accumuler à la longue, la direction vraie du vent est relevée, au sommet de la Tour, au moment des observations directes; de plus, l'orientation de la girouette est pointée très fréquemment au moyen d'une lunette, du Bureau météorologique même; enfin le dépouillement a été fait seulement avec une approximation quatre fois moindre que celle dont l'instrument est théoriquement susceptible; la circonférence était divisée en 32 parties en partant du Nord vers l'Est, de sorte que dans tout ce qui suit le chiffre 32 correspond à N., 1 à N. $\frac{1}{4}$ N.-E., 2 à N.-N.-E., 4 à N.-E., 8 à E., 16 à S., 24 à O., et ainsi de suite. Nous étudierons d'abord dans ce qui suit la variation diurne du vent à la Tour Eiffel; nous avons jugé inutile d'entrer dans les mêmes détails pour les observations du Bureau, où la direction du vent pourrait être influencée par les obstacles environnants. A la Tour au contraire, où la girouette est environ à 300 *m* au-dessus du sol, l'horizon est absolument libre de tous côtés.

« 1° *Variation diurne du vent à la Tour Eiffel.* — Nous avons d'abord relevé le nombre de fois que le vent a soufflé dans chaque direction (de 1 à 32) pendant tous les mois et à toutes les heures des six années observées. Cela donne pour chaque heure un total de 186 observations dans les mois de 31 jours, de 180 dans les mois de 30 jours et de 169 en février. Ce nombre étant certainement trop petit encore pour que les perturbations puissent être éliminées, nous avons réuni dans un même total les directions observées à trois heures consécutives, ce qui donne la loi de variation de la direction du vent, pour huit époques équidistantes séparées l'une de l'autre par un intervalle de trois heures. Ainsi, dans les tableaux qui suivent, les nombres qui indiquent la fréquence des différentes directions du vent à zéro sont la somme des nombres obtenus pour 23 heures, 0 heure et 1 heure; les nombres indiqués pour 3 heures sont la somme de ceux qui ont été obtenus à 2 heures, 3 heures et 4 heures, et ainsi de suite. Le total des nombres relatifs à une heure portée au tableau est ainsi de 558, 540 et 507, selon que l'on considère les mois de trente et un et trente jours, ou le mois de février. Le nombre total des observations de chaque mois est alors respectivement 4.464, 4.320 et 4.056. »

On trouvera dans les tableaux donnés par M. Angot, et que nous ne pouvons reproduire en raison de leur étendue, le détail des observations de direction du vent recueillies ainsi à la Tour Eiffel pendant les six années 1890-1895.

Nous reproduisons seulement pour exemple les résultats de juillet :

1890-1895. Tour Eiffel. — *Fréquence des différentes directions du vent.*

Juillet.

h	0. N.	1.	2.	3.	4. N.-E.	5.	6.	7.	8. E.	9.	10.	11.	12. S.-E.	13.	14.	15.	16. S.	17.	18.	19.	20. S.-O.	21.	22.	23.	24. O.	25.	26.	27. N.-O.	28.	29.	30.	31.	Calme.
0.....	17	17	16	18	17	6	6	15	15	11	15	9	4	2	2	8	8	10	11	19	14	47	31	24	19	25	32	32	33	27	20	12	16
3.....	18	10	13	13	6	14	10	7	11	18	10	14	4	4	11	5	10	10	16	13	20	50	33	19	23	31	39	25	35	24	13	16	13
6.....	15	17	13	8	2	11	8	9	7	10	13	6	16	7	10	8	8	12	24	22	21	46	28	19	34	34	24	30	27	18	12	9	30
9.....	15	12	15	11	4	7	5	6	10	14	6	3	7	10	9	11	9	22	30	32	37	31	29	40	37	27	23	27	13	9	7	13	24
12.....	12	14	9	4	3	5	7	8	4	9	10	11	7	8	5	6	10	13	35	27	41	50	37	37	31	40	26	23	19	9	16	13	9
15.....	5	15	13	8	6	7	3	10	9	13	3	2	6	9	5	6	14	9	24	28	40	49	33	41	27	27	39	24	30	25	11	12	5
18.....	13	18	15	6	4	2	6	7	7	14	6	8	7	4	8	6	9	10	11	14	28	40	41	30	20	20	31	36	44	31	21	16	13
21.....	18	23	24	9	9	13	5	9	16	14	10	5	4	5	2	9	6	11	6	12	32	29	28	32	28	17	27	36	31	30	28	15	15
Total....	113	126	118	80	51	65	50	71	79	103	73	58	55	49	52	59	74	97	157	167	233	342	260	242	228	221	241	233	232	176	128	106	125

« Pour faciliter l'étude de la variation diurne de la direction du vent, il est commode de remplacer chacune de ses 32 directions par leurs composants sur les directions N. et E., S. et O.; ces directions se ramèneront elles-mêmes aux deux principales N. et E. en tenant compte des signes.

« Soit m_p le nombre de fois que le vent a soufflé de la direction p désignée en chiffre dans les tableaux précédents et qui correspond à un angle $2\pi\frac{p}{32}$ avec le méridien compté du Nord vers l'Est. La composante Nord n de tous les vents sera donnée par la formule $n = \Sigma m_p \cos 2\pi\frac{p}{32}$ en faisant la somme de tous les produits analogues pour tous les vents dont la direction est comprise entre 0 et 8 et entre 24 et 32.

« La composante Est $e = \Sigma m_p \sin 2\pi\frac{p}{32}$ en faisant la somme des produits de 0 à 16.

« On calcule d'une manière analogue la composante Sud S. (directions entre 8 et 24) et la composante Ouest O. (directions entre 16 et 32).

« Les cosinus sont égaux aux sinus des points symétriques par rapport à 45°; ainsi, $\sin 2\pi\frac{3}{32} = \cos 2\pi\frac{5}{32}$; de sorte que l'on n'a à considérer que les valeurs numériques des cosinus de 0 à 7 divisions, soit 0,9808, 0,9239, 0,8315, 0,7071, 0,5556, 0,3827 et 0,1951.

« Quant aux composantes principales suivant le méridien et la perpendiculaire, elles sont :

$$N = n - s \qquad E = e - o$$

le signe + indique que les composantes principales sont dirigées respectivement suivant le Nord ou l'Est et le signe — qu'elles sont dirigées vers le Sud ou l'Ouest.

« La direction du vent par rapport au méridien, l'angle α étant compté de 0 à 360°, est donnée par la formule $\mathrm{Tg}\alpha = \frac{E}{N}$.

« La grandeur R de cette résultante est $R = \sqrt{N^2 + E^2}$.

« Ce dernier nombre, divisé par le nombre d'observations du mois, donnera la valeur relative de la résultante. Cette valeur relative serait égale à l'unité, si le vent avait soufflé rigoureusement de la même direction pendant tout le mois; elle est en réalité beaucoup plus petite et d'autant plus que la direction du vent a été plus variable.

« Nous donnons ci-dessous, pour le mois de juillet pris comme exemple, les valeurs de ces composantes et enfin, pour chaque heure, la direction moyenne du vent résultant, comptée de 0 à 360°, à partir du Nord vers l'Est.

Composantes principales de la direction du vent.

	0 h.	3 h.	6 h.	9 h.	12 h.	15 h.	18 h.	21 h.	Moy.
n	195,0	175,2	149,2	126,9	125,6	147,2	187,5	208,6	164,4
e	110,1	106,0	93,8	82,9	72,8	73,6	73,9	100,7	89,2
s	123,4	140,0	159,6	186,2	189,5	171,5	135,3	115,1	152,6
o	266,0	276,7	271,2	278,2	312,4	317,4	302,8	267,0	286,4
N	71,6	35,2	— 10,4	— 59,3	— 63,9	— 24,3	52,2	93,5	11,8
E	—155,9	—170,7	—177,4	—195,3	—239,6	—243,8	—228,9	—166,3	—197,2

Variation diurne de la direction moyenne du vent.

α	295°	282°	267°	253°	255°	264°	283°	299°	273°

« Les nombres de ce dernier tableau mettent déjà assez nettement en évidence une variation diurne de la direction du vent : dans presque tous les mois sans exception, le vent tourne en sens contraire des aiguilles d'une montre (de l'Ouest vers le Sud) dans la matinée, puis revient en sens inverse dans l'après-midi.

« L'étude des composantes elles-mêmes se fait par les considérations suivantes :

« La direction du vent que l'on observe à un moment quelconque peut être considérée comme la résultante de deux actions : 1° le vent moyen qui soufflerait de la même direction dans toute la journée; 2° une brise diurne qui change de direction suivant les heures. Le vent moyen est connu : ses composantes dans les quatre directions principales sont précisément indiquées dans le tableau précédent sous le titre *Moyenne*. Pour avoir à chaque heure les composantes de la brise diurne, il suffira donc de retrancher, des nombres donnés ci-dessus pour cette heure, le nombre correspondant que l'on trouve dans la colonne *Moyenne*. Nous

donnons ici le résultat de ce calcul pour les deux composantes principales du vent, dans le méridien et dans la direction perpendiculaire :

Direction du vent à la Tour Eiffel (Juillet).

1° Vent moyen.

Composante N..... 11,8 Composante E..... —197,2

2° Brise diurne.

Heures.	Composante Nord.	Composante Est.
0.....	59,8	41,3
3.....	23,4	26,5
6.....	—22,2	19,8
9.....	—71,1	1,9
12.....	—75,7	—42,4
15.....	—36,1	—46,6
18.....	40,4	—31,7
21.....	81,7	30,9

« Non seulement dans ce mois, mais dans tous ceux de mars à octobre, les chiffres analogues à ceux ci-dessus mettent en évidence une variation diurne bien nette (qui se manifeste moins clairement dans les mois de novembre à février, en raison des perturbations dues aux tempêtes).

« La figure ci-dessous (fig. 202) donne un exemple de cette variation pour la moyenne de juillet. Dans cette figure, la direction moyenne du vent à un moment quelconque de la journée s'obtient en joignant le point O à un des points marqués : 0 heure, 3 heures, 6 heures,... 21 heures. Ces derniers points se trouvent répartis sur une courbe très régulière ainsi tracée :

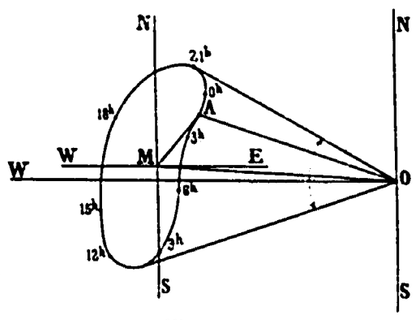


Fig. 202.

« Le vent moyen a pour direction MO, déterminée à l'aide des composantes N. et E. prises comme ordonnée et comme abscisses ; puis en portant à partir de M, comme origine, les valeurs ci-dessus des composantes de la brise diurne. Cette direction est dans le cas actuel sensiblement O.-N.-O. Le vent AO à une heure quelconque peut être considéré comme étant la résultante du vent moyen MO et d'une brise diurne MA. La figure montre que dans le cours de la journée cette brise diurne décrit, dans le sens direct des aiguilles d'une montre, une rotation complète autour du point M.

« La brise diurne a une composante Sud de 5 heures à 16 heures environ, et une composante Nord le reste de la journée. Quant au vent lui-même, il progresse en sens inverse des aiguilles d'une montre de 21 heures à 10 heures du matin du N.-N.-E. au S.-S.-O. environ, et rétrograde de 10 heures à 21 heures du S.-S.-O. au N.-N.-E.

« (La courbe décrite par le vecteur MA est moins régulière dans les autres saisons, mais conserve en général le même caractère, au moins pendant huit mois de l'année.) »

Si, au lieu de considérer les fréquences du vent, on considère les vitesses, les tableaux dressés par M. Angot montrent que l'on arrive aux mêmes conclusions. On retrouve encore une brise diurne bien nette, qui effectue dans le cours des vingt-quatre heures une rotation du N. vers l'E. Mais de plus cette brise diurne est plus intense en été qu'en hiver ; en outre, la variation de la vitesse résultante R de N. et de E. en été est tout à fait caractéristique : on observe un minimum absolu vers le lever du soleil au moment du maximum de la température, et un autre minimum moins profond vers 15 heures, au moment du maximum de la température; deux maxima se montrent entre 9 heures et midi et vers 9 heures du soir. Il est probable que ces faits intéressants se dégageront d'une manière plus nette et plus précise quand la période d'observation sera plus longue.

2° *Variation annuelle de la direction du vent.* — On trouvera dans les tableaux suivants le résumé des observations de direction effectuées tant au Bureau météorologique qu'à la Tour Eiffel pendant les six années 1890-1895. M. Angot donne pour chaque mois et pour l'année le nombre total de fois que le vent a soufflé dans chacune des 32 directions, ainsi que les quatre composantes de la fréquence suivant la direction Nord, Est, Sud et Ouest, et enfin les deux composantes principales suivant le méridien N. et la perpendiculaire E. Nous relatons pour abréger les observations rapportées à huit directions seulement.

1890-1895. — *Fréquence des différentes directions du vent au B. C. M et à la T. E. S.*

	JANVIER.		FÉVRIER.		MARS.		AVRIL.		MAI.		JUIN.		JUILLET.		AOUT.		SEPTEMBRE.		OCTOBRE.		NOVEMBRE.		DÉCEMBRE.		TOTAUX.		RAPPORT O/O	
	B.C.M.	T.E.S.	B.C.M.	T.E.S.	B.C.M.	T.E.S.	B.C.M.	T.E.S.	B.C.M.	T.E.S.	B.C.M.	T.E.S.	B. C. M.	T. E. S.	B. C. M.	T. E. S.	B.C.M.	T.E.S.	B.C.M.	T.E.S.	B.C.M.	T.E.S.	B.C.M.	T.E.S.	B. C. M.	T. E. S.	B.C.M.	T.E.S.
Nord (nos 31 à 2)....	395	682	283	422	269	459	556	717	633	878	567	752	330	463	278	387	353	413	270	415	201	279	226	332	4361	6199	8,3	11,8
Nord-Est (nos 3 à 6).	499	493	963	888	724	633	874	904	670	671	575	614	316	246	325	407	618	611	623	562	581	514	673	522	7443	7095	14,1	13,5
Est (nos 7 à 10).....	261	252	540	571	485	630	478	611	309	373	228	272	172	326	180	244	319	417	159	375	389	408	475	622	3995	5101	7,6	9,7
Sud-Est (nos 11 à 14).	416	317	191	319	171	227	197	271	155	226	131	217	109	214	89	166	157	381	233	242	352	304	267	337	2468	3241	4,7	6,1
Sud (nos 15 à 18)....	438	573	215	318	323	437	219	421	348	419	224	260	321	387	379	355	285	376	608	620	615	701	475	472	4470	5369	8,7	10,2
S.-O. (nos 19 à 22)..	1109	957	826	651	920	730	586	444	633	516	839	589	1320	1002	1439	1137	763	692	1111	1097	837	913	1085	921	11490	9682	21,8	18,5
O. (nos 23 à 26).....	504	618	425	531	686	732	380	367	544	507	692	766	841	932	682	916	438	681	383	632	450	603	477	674	6304	8014	12,3	15,3
N.-O. (nos 27 à 30)..	286	437	161	268	324	503	450	482	543	702	498	739	500	769	394	701	356	558	235	405	216	434	176	422	4139	6420	7,8	12,1
Calmes.....	536	110	450	88	562	113	580	103	629	112	566	111	555	125	678	121	1029	161	840	116	679	161	610	139	7714	1463	14,7	2,8
Totaux.....	4464	4464	4056	4056	4464	4464	4320	4320	4464	4464	4320	4320	4464	4464	4464	4464	4320	4320	4464	4464	4320	4320	4464	4464	52584	52384	100,0	100,0
Composantes :																												
n.....	982	1421	1026	1260	1040	1334	1512	1730	1315	1912	1392	1817	999	1315	852	1275	1061	1367	868	1147	782	1005	821	1060	12850	16663		
e.....	940	905	1472	1529	1192	1302	1348	1576	1002	1169	829	971	512	714	517	708	944	1198	821	1022	1077	1027	1202	1326	11839	13147		
s.....	1534	1495	949	1035	1085	1159	790	985	906	1015	873	847	1257	1221	1391	1251	920	1170	1532	1535	1483	1518	1427	1368	14153	14629		
o.....	1590	1730	1190	1245	1652	1681	1147	1070	1160	1447	1703	1735	2232	2292	2127	2353	1297	1611	1461	1816	1321	1712	1487	1751	18670	20176		
N.....	—532	— 74	77	225	— 43	195	722	745	609	897	519	970	— 258	94	— 539	24	135	197	—661	—388	—701	—513	—606	—308	—1303	2034		
E.....	—650	—823	282	284	—460	—379	201	506	—458	— 278	—874	—764	—1720	—1578	—1610	—1645	—333	—416	—640	—824	—244	—685	—285	—425	—6811	—7029		

Il résulte tout d'abord des 52.584 observations de ce tableau faites simultanément à la terrasse du Bureau central et au sommet de la Tour, que l'examen des colonnes de rapports pour 100 montre :

1° Que le nombre des calmes est beaucoup plus grand au Bureau central météorologique qu'à la Tour (14,7 p. 100 au lieu de 2,8 p. 100).

2° Que le vent le plus fréquent au Bureau central météorologique et à la Tour est le S.-O. (21,8 p. 100 au Bureau central météorologique et 18,5 à la Tour).

3° Que le vent le moins fréquent au Bureau central météorologique et à la Tour est le S.-E. (4,7 p. 100 au Bureau central météorologique et 6,1 à la Tour).

4° Que le vent du Nord (entre 0 et 6 d'une part et 27 à 31 de l'autre) est plus fréquent au sommet de la Tour qu'au Bureau (37,4 p. 100 contre 30,2 p. 100).

5° Que les vents d'Ouest (entre 19 et 26) ont à peu près la même importance au Bureau central météorologique et à la Tour (34,11 p. 100 et 33,8 p. 100).

Ces derniers se font plus facilement sentir à la surface du sol que les vents du Nord qui restent plutôt dans les hautes régions.

Mais la comparaison des composantes donne des résultats plus précis et encore plus intéressants.

« Au moyen des deux composantes principales N. et E. on calcule, pour chaque mois et pour l'année, la grandeur R de la résultante et l'angle « qu'elle fait avec le méridien par les formules :

$$R = \sqrt{N^2 + E^2}, \qquad \text{tang}\alpha = \frac{E}{N}$$

« Au lieu de la grandeur R, il est préférable de considérer le rapport $r = \frac{R}{p}$, p étant le nombre total des observations d'où est déduite la valeur R ; r représente alors le *poids relatif* de la résultante. Ce nombre serait égal à l'unité, si, pendant toute la période considérée, le vent avait soufflé constamment de la même direction; il est toujours nécessairement beaucoup plus petit, mais sa valeur permet de déterminer si le vent résultant calculé a réellement une signification ; il est clair que si la valeur de r tombe, par exemple, au-dessous de 0,1, il n'y a plus, à proprement parler, de vent moyen, et que le vent a soufflé, en réalité, de toutes les directions. Nous donnons ci-dessous les valeurs ainsi trouvées pour r et α.

	Tour Eiffel.		Bureau météorologique.	
	r.	α.	r.	α.
Janvier.....	0,19	265°	0,19	230°
Février.....	0,09	52°	0,07	75°
Mars.....	0,10	297°	0,10	264°
Avril.....	0,21	31°	0,17	16°
Mai.....	0,21	343°	0,17	323°
Juin.....	0,20	322°	0,24	301°
Juillet.....	0,35	273°	0,39	261°
Août.....	0,37	271°	0,38	252°
Septembre.....	0,11	295°	0,09	291°
Octobre.....	0,20	245°	0,21	224°
Novembre.....	0,20	232°	0,17	199°
Décembre.....	0,12	234°	0,15	205°
Année.....	0,14	286°	0,13	259°

« Dix mois sur douze donnent, dans les deux stations, un vent résultant qui a une composante Ouest très marquée ; février et avril seulement ont un vent moyen compris dans le quadrant N.-E. ; encore, pour février, la faible valeur du poids relatif *r* de la résultante indique-t-elle que cette résultante n'a pas grande signification et que la direction du vent moyen pendant ce mois est mal déterminée.

« En moyenne annuelle, le vent est assez voisin de O.-N.-O. à la Tour Eiffel et de O.-S.-O. au Bureau météorologique, l'angle que forment les directions moyennes dans les deux stations étant de 27°. Une différence de même sens et presque de même valeur se retrouve dans tous les mois, sauf en février.

« Cet écart ne peut être imputé aux erreurs d'observation. L'orientation des deux girouettes est contrôlée dans plusieurs directions au moyen de repères très éloignés (monuments de Paris) dont l'azimut a été déterminé directement pour chaque station; de ce fait, l'erreur possible dans l'estimation absolue de la direction du vent ne doit pas, dans les moyennes, dépasser 1° ou 2°. On ne saurait non plus faire intervenir des influences locales qui se feraient sentir à la station inférieure ; rien dans la situation topographique du Bureau météorologique n'indique la probabilité de telles influences, qui se trouve exclue, du reste, par ce fait que la déviation est sensiblement la même que le vent souffle du N.-E. (avril), du S. (novembre), du S.-O. (janvier et octobre), de l'O. (mars et juillet), ou du N.-O. (mai et juin).

« On doit donc admettre comme fait d'observation que le vent éprouve réellement en moyenne, au sommet de la Tour Eiffel, une déviation de 25° environ à droite de celui qu'on observe dans les couches voisines du sol. Le sens de cette déviation est précisément celui qui résulterait d'une diminution dans le frottement ; mais on ne peut encore affirmer que ce soit la cause unique ou même principale du phénomène. Peut-être y a-t-il simplement un effet de la ville qui se traduit, comme nous l'avons indiqué depuis la première année d'observations, par une augmentation locale de température et une diminution de pression pouvant entraîner une déviation des vents inférieurs. »

Résumé.

Il paraît résulter de la discussion des observations sur la direction du vent par M. A. Angot que :

1° Comme *variation diurne*, le vent tourne en sens contraire des aiguilles d'une montre (de l'ouest vers le sud) dans la matinée, puis revient en sens inverse dans l'après-midi;

2° Comme *moyenne annuelle*, le vent est assez voisin de O.-N.-O à la Tour Eiffel, et de O.-S.-O au Bureau météorologique, l'angle que forment les directions moyennes dans les deux stations étant de 27°

Ces résultats sont nouveaux et d'un grand intérêt.

V. — Composante verticale du vent.

M. Angot n'a pas encore résumé les résultats relatifs à cette composante verticale; il faut les rechercher dans les Mémoires de 1891 à 1894 que nous allons rappeler brièvement; nous reproduirons principalement les conclusions qui sont identiques dans toutes les années.

L'étude des courants verticaux offre un grand intérêt pour la météorologie et il n'a pas encore été fait d'observations de ce genre dans une situation aussi satisfaisante qu'à la Tour Eiffel; aussi M. Angot donne-t-il à ce sujet les tableaux les plus détaillés, dont nous ne rappellerons qu'une faible partie, en laissant de côté les années 1892 à 1893 dont les résultats ne sont pas très différents des années extrêmes.

« *Mémoire de 1891*. — La composante verticale du vent a été mesurée au moyen d'un appareil analogue à ceux qu'avaient déjà employés dans ce but le P. Dechevrens et M. Garrigou-Lagrange. Cet instrument se compose de quatre ailettes planes, inclinées à 45° et portées par quatre bras horizontaux en croix, réunis par un axe vertical, autour duquel peut tourner le système. Les ailettes étant inclinées dans le même sens par rapport à l'axe, il est clair que le moulinet doit rester immobile dans un courant d'air horizontal, tourner dans un sens quand le vent a une composante verticale ascendante et dans l'autre sens quand le vent a une composante horizontale descendante. Au moyen d'un dispositif très ingénieux imaginé par MM. Richard frères, et qui est du reste identique à celui de leur girouette, les mouvements du moulinet sont transmis à distance, au moyen de quatre fils seulement, à un cylindre vertical, devant une génératrice duquel descend une plume, qui inscrit

ainsi tous les mouvements du moulinet. Le tracé s'effectue de gauche à droite quand la composante du vent est ascendante, de droite à gauche quand la composante est descendante; il se réduit à une ligne verticale quand le moulinet reste immobile. Le moulinet a été taré sur un manège de manière que le déplacement angulaire du cylindre récepteur, pendant un temps donné, peut être traduit immédiatement en kilomètres parcourus par le vent dans le sens vertical. Le moulinet est installé au sommet de la Tour Eiffel, à la même hauteur que les anémomètres (305 *m* au-dessus du sol).

« L'observation de cet instrument présente de grandes difficultés; il peut tourner même dans un courant parfaitement horizontal si la vitesse du vent n'est pas rigoureusement la même aux deux extrémités du diamètre du moulinet, et il suffit pour cela du plus petit obstacle. Les premières observations, faites en 1889 et au commencement de 1890, ont révélé une cause d'erreur de ce genre : la tige qui porte le paratonnerre de la Tour Eiffel pouvait faire écran tantôt d'un côté du moulinet, tantôt de l'autre, quand le vent soufflait de deux directions déterminées; pour l'une de ces directions, il y avait alors renforcement apparent des vents ascendants, tandis que, pour l'autre, il y avait renforcement apparent des vents descendants.

« J'ai fait remédier à cette cause d'erreur en plaçant le moulinet au centre d'un grand cylindre vertical ouvert à ses deux extrémités. Il y a bien à craindre encore les remous que le vent peut produire dans ce cylindre; mais il n'y a plus aucune raison pour que ces remous introduisent une erreur systématique; du reste, l'examen minutieux des observations n'a révélé aucune erreur de ce genre. Quoi qu'il en soit, on ne peut donner les observations de la composante verticale du vent qu'avec beaucoup de réserves, et il y a lieu de chercher à perfectionner, si cela est possible, la méthode d'observation.

« Nous indiquons dans le tableau suivant, pour chaque mois, le nombre d'heures pendant lesquelles la composante verticale du vent a été constamment ascendante, tantôt ascendante et descendante (variable), constamment descendante et constamment nulle; puis le total des chemins parcourus respectivement par les vents ascendants, par les vents descendants, et le rapport de ces deux nombres. Enfin, pour permettre d'apprécier l'importance relative des courants ascendants, nous avons ajouté pour chaque mois la vitesse moyenne, en mètres par seconde, de la composante verticale du vent, et à côté la vitesse moyenne de la composante horizontale, mesurée par le moulinet Richard; le rapport de ces deux nombres est la cotangente de l'inclinaison du vent sur l'horizontale; nous donnons ce rapport ainsi que l'inclinaison correspondante, exprimée en degrés et dixièmes de degré.

1890-1891. — *Totaux mensuels et moyennes de la composante verticale du vent.*

	Nombre d'heures de vents				Chemin total parcouru par les vents.			Vitesse moyenne en mètres par seconde de la composante.			
	ascendants.	variables.	descendants.	Nuls.	ascendants.	descendants.	Rapport.	verticale.	horizontale.	Rapport.	Inclinaison.
					km	*km*		*m*	*m*		°
Novembre 1890 (1).....	422	121	75	84	1331,3	251,0	5	0,43	9,83	23	2,5
Décembre 1890.....	636	43	0	65	1340,0	8,4	160	0,50	6,66	13	4,3
Janvier 1891.....	612	78	20	34	2472,4	75,5	33	0,89	11,02	12	4,6
Février.....	548	70	8	46	1170,7	38,4	31	0,47	5,88	13	4,6
Mars.....	489	182	52	21	2119,0	291,1	7	0,68	10,48	15	3,7
Avril (2).....	411	185	29	23	1405,6	124,5	11	0,55	8,10	15	3,9
Mai.....	439	239	45	21	1572,7	194,5	8	0,51	8,31	16	3,5
Juin.....	414	248	24	34	1374,8	130,3	11	0,48	6,69	14	4,1
Juillet.....	350	311	51	32	1398,1	184,7	8	0,45	7,24	16	3,6
Août.....	361	323	46	14	1600,9	205,7	8	0,52	9,07	17	3,3
Septembre.....	410	241	34	35	1430,6	140,5	10	0,50	7,28	15	3,9
Octobre.....	631	92	11	10	3136,0	46,3	68	1,15	11,02	10	5,9
Novembre.....	557	35	22	106	1909,4	21,2	90	0,73	8,61	12	4,8
Décembre.....	648	51	7	38	2128,8	34,4	62	0,78	10,01	13	4,4

« L'examen des tableaux qui précèdent conduit aux conclusions suivantes :

« 1° Dans tous les mois sans exception, les vents ascendants l'emportent considérablement sur les vents descendants. Le rapport des chemins totaux parcourus par le vent dans ces deux sens varie peu dans les mois compris entre mars et septembre; il est alors en moyenne de 8,6. Dans les mois froids (novembre 1890 excepté) que comprennent les observations, le rapport est beaucoup plus grand; il est en moyenne de 54,2 et atteint même 160 en décembre 1890. Il paraît difficile d'expliquer cette prépondérance des vents ascendants : on ne peut l'attribuer à la température, puisqu'elle s'exagère en hiver. Ce ne peut être non plus un effet local causé par les ondulations du sol, puisque la Tour Eiffel domine de beaucoup toute la région; pour trouver

(1) Lacune de 18 heures.

(2) Lacune de 3 jours.

des altitudes comparables, il faudrait aller jusqu'aux limites orientales et méridionales du bassin de la Seine. Ajoutons que cette prépondérance se manifeste par toutes les directions de vents, ce qui exclut l'hypothèse d'une influence de l'orientation de l'instrument par rapport à la Tour elle-même. Tant qu'il ne pourra pas être prouvé que cette prépondérance des vents ascendants est due à un défaut inhérent au mode même d'observation, il faudra donc l'admettre, quelque paradoxale qu'elle puisse paraître.

« 2° Les périodes pendant lesquelles la composante verticale du vent est constamment descendante ou nulle se présentent surtout pendant la nuit; on en trouve quelquefois pendant le jour, mais en hiver et jamais dans la saison chaude. La durée de ces périodes ne dépasse pas quelques heures, excepté en hiver, par les temps calmes.

« 3° Les périodes pendant lesquelles il y a alternance de vents ascendants et descendants sont surtout fréquentes pendant la saison chaude, de mars à septembre, au milieu du jour; elles sont même alors la règle. Les vents ascendants l'emportent encore beaucoup, mais ils sont fréquemment interrompus par des alternatives de courants descendants. Ces alternatives sont rares pendant la nuit en été et en tout temps pendant l'hiver. Celles que nous avons indiquées alors dans l'un des tableaux précédents proviennent principalement des heures pendant lesquelles il y a eu changement de régime, où le vent, après avoir été descendant, est devenu ascendant, ou réciproquement; ce ne sont donc pas des alternatives de vents ascendants et descendants proprement dites.

« 4° Les périodes de vent constamment ascendant ont une durée très variable; elles sont surtout importantes pendant la saison froide, où on les observe parfois sans interruption pendant plusieurs jours, et même pendant plus d'une semaine.

« 5° Le rapport moyen des composantes verticale et horizontale du vent est très petit, c'est-à-dire que l'inclinaison du vent sur l'horizon est toujours faible; pour les quatorze mois que nous avons considérés, cette inclinaison moyenne est de 4°.

« *Mémoire de 1894.* — Nous donnons ci-dessous un tableau semblable à celui de 1891.

1894. — *Totaux mensuels et moyennes de la composante verticale du vent.*

	Nombre d'heures de vents				Vitesse moy. de la composante.			
	ascendants.	variables.	descendants.	Nuls.	verticale.	horizontale.	Rapport.	Inclinaison.
					m	*m*		°
Janvier (1)	136	0	0	56	»	»	»	»
Février (2)	179	71	15	23	»	»	»	»
Mars (3)	427	170	19	8	»	»	»	»
Avril (4)	312	131	5	8	»	»	»	»
Mai	410	248	43	43	0,64	8,15	12,7	4,5
Juin (5)	340	249	5	30	»	»	»	»
Juillet	281	401	25	37	0,49	7,68	15,7	3,6
Août	360	316	47	21	0,50	8,23	16,5	3,5
Septembre	493	164	22	41	0,81	7,83	9,7	5,9
Octobre	529	130	11	74	0,70	8,62	12,3	4,6
Novembre	512	137	40	31	1,00	9,47	9,5	6,0
Décembre	471	146	74	53	0,64	9,70	15,2	3,8

« Comme on le voit par les nombres de la dernière colonne, l'inclinaison moyenne du vent sur l'horizontale est toujours très faible; elle a atteint sa plus grande valeur, 6°, en novembre.

« Les conclusions que l'on peut tirer des tableaux qui précèdent sont identiques à celles qu'avait fournies la discussion des années précédentes; il est donc inutile d'y insister, et nous renverrons pour ce point aux Mémoires antérieurs.

« Nous terminerons par quelques détails relatifs à la tempête du 12 novembre 1894, qui a présenté une violence extraordinaire à Paris et dans tout le nord de la France. Le centre de la dépression se trouvait aux îles Scilly à 7 heures; il est à Cherbourg vers 18 heures, puis remonte par le Pas de Calais et la mer du Nord; il a passé ainsi à 200 *km* environ au nord de Paris, où le minimum barométrique a été observé entre 17 heures et 19 heures.

« Le tableau suivant donne, en mètres par seconde, la vitesse moyenne pour chaque heure de la composante horizontale et de la composante verticale à la Tour Eiffel; nous y avons ajouté l'indication de l'inclinaison du vent sur l'horizontale et de sa direction.

(1) 8 jours. (2) 12 jours. (3) 26 jours. (4) 19 jours. (5) 26 jours.

Heures.	Vitesse horizontale.	Vitesse verticale.	Inclinaison.	Direction.
	m	m	°	
12 nov. de midi à 13h.....	18,3	2,5	7,9	S
de 13 à 14.....	18,9	2,4	7,1	S¼SO
de 14 à 15.....	23,1	3,0	7,5	SSO
de 15 à 16.....	25,8	3,5	7,7	SSO
de 16 à 17.....	30,6	4,5	8,4	S¼SO
de 17 à 18.....	32,8	5,0	8,7	S¼SO
de 18 à 19.....	33,9	5,1	8,5	SSO

Heures.	Vitesse horizontale.	Vitesse verticale.	Inclinaison.	Direction.
	m	m	°	
12 nov. de 19h à 20h.....	33,6	4,9	8,4	SSO
de 20 à 21.....	30,8	4,3	7,9	SO¼S
de 21 à 22.....	27,5	2,9	6,1	SO
de 22 à 23.....	28,3	1,5	3,1	SO
de 23 à 24.....	24,2	0,8	1,8	SO¼O
13 nov. de 0 à 1.....	20,0	0,4	1,2	OSO
de 1 à 2.....	18,9	0,5	1,6	OSO

« Pendant toute la durée de la tempête, le vent a présenté une composante verticale dirigée de bas en haut. L'inclinaison du vent, maximum au moment où le centre de la tempête est le plus rapproché (8°,7), est très grande encore et presque la même dans la moitié antérieure du tourbillon. Elle devient très faible au contraire à une certaine distance dans la partie postérieure, où le vent ascendant est alors coupé par de fréquentes alternances de vents descendants, ce qui ne se présentait pas dans la partie antérieure. En avant de la dépression, le vent est donc nettement et constamment ascendant, tandis que tout à fait en arrière il est à peu près exactement horizontal. La vitesse du courant horizontal était, du reste, la même au commencement et à la fin, et la direction a varié seulement de 45°, entre les moments des plus grandes et plus petites vitesses verticales; ces phénomènes sont donc réels et ne peuvent être attribués au mode d'exposition des instruments.

« D'autres tempêtes observées antérieurement avaient donné des résultats analogues, mais qui se rapportent tous également à la partie du tourbillon située à droite de la trajectoire. »

§ 4. — Examen de quelques observations directes de température en 1894.

Dans les tableaux des températures que nous avons extraits du Mémoire récapitulatif de M. A. Angot, on ne voit figurer que des *moyennes horaires* mensuelles s'étendant à une période de cinq années. Les chiffres qu'ils renferment sont établis en prenant pour chaque heure la moyenne des 30 ou 31 observations du mois et ensuite la moyenne de ces cinq premières moyennes.

Cet emploi des moyennes horaires du mois, par lequel on nivèle, d'une façon un peu sommaire, tous les écarts, donne bien l'allure générale relative des phénomènes observés; mais on comprend que les chiffres ainsi obtenus, dans lesquels entrent des éléments dont les écarts sont parfois de 25 degrés, sont loin de fournir des valeurs voisines de celles qu'on relèverait directement dans chaque cas particulier. Mais la représentation même approximative de ces dernières, si on voulait quelque peu les généraliser, offre des difficultés à peu près inextricables, et ce n'est que par des exemples particuliers que l'on peut se rendre compte de ces variations dans leur réalité.

Il n'est donc pas inutile de relater un certain nombre d'observations directes.

Nous avons pris comme exemple l'une des années entrant dans la moyenne déjà étudiée, l'année 1894, et nous indiquons dans le tableau qui suit deux séries d'observations empruntées aux relevés détaillés conservés au Bureau, et faites simultanément au Bureau central et à la Tour. Nous avons retenu seulement, pour abréger, quatre des mois de l'année : janvier comme exemple des mois froids, juillet comme exemple des mois chauds, et enfin avril et octobre comme mois intermédiaires. — De plus, dans les quatre mois, nous n'avons considéré que deux des heures de la journée donnant approximativement au Bureau les minima du matin et les maxima de l'après-midi. — Ces heures sont 6 heures et 14 heures pour janvier et octobre, 5 heures et 15 heures pour avril et juillet.

Les colonnes de différences horaires indiquent l'excès de la température du sol sur celle du sommet (B. C. M. — T. E.). Les signes — correspondent aux inversions de température.

Observations directes et différences des températures au B. C. M. et à la Tour Eiffel (le matin et dans l'après-midi pendant les mois de janvier, avril, juillet et octobre 1894) (1).

DATES DU MOIS.	JANVIER.				AVRIL.				JUILLET.				OCTOBRE.				DIFFÉRENCES HORAIRES.							
	6 h.		14 h.		5 h.		15 h.		5 h.		15 h.		6 h.		14 h.		JANVIER		AVRIL		JUILLET		OCTOBRE	
	B. C. M.	T. E.	B.C.M.	T. E.	B.C.M.	T. E.	B.C.M.	T. E.	B.C.M.	T. E.	B.C.M.	T. E.	B.C.M.	T. E.	B.C.M.	T. E.	6 h.	14 h.	5 h.	15 h.	5 h.	15 h.	6 h.	14 h.
1...	— 2,5	— 0,4	2,1	1,2	9,1	12,0	19,9	15,5	17,2	21,7	31,8	27,2	6,6	7,3	13,8	9,8	—2,1	0,9	—2,9	4,4	—4,5	4,6	—0,7	4,0
2...	— 0,3	— 0,8	0,7	— 2,6	7,9	11,3	19,9	15,5	18,4	25,2	29,6	25,3	8,3	5,9	13,9	10,0	0,5	3,3	—3,4	4,4	—6,8	4,3	2,4	3,9
3...	— 5,8	— 9,0	—3,7	— 7,0	7,1	11,5	20,9	17,5	17,0	14,2	20,7	17,0	9,5	6,4	13,2	10,2	3,2	3,3	—4,4	3,4	2,8	3,7	3,1	3,0
4...	— 9,8	—12,7	—9,6	—12,8	10,1	12,0	19,6	16,5	12,7	11,7	20,9	18,2	9,1	6,2	10,7	8,4	2,9	3,2	—1,9	3,1	1,0	2,7	2,9	1,7
5...	—12,3	—15,4	—7,0	— 8,9	10,8	12,5	20,8	17,4	13,7	14,8	26,9	22,8	9,5	7,0	13,0	9,8	3,1	1,9	—1,7	3,4	—1,1	4,1	2,5	3,2
6...	— 3,4	— 2,8	1,0	— 1,5	10,9	14,5	24,3	20,5	16,2	22,1	32,4	28,8	10,1	8,0	13,1	10,2	—0,6	0,5	—3,6	3,8	—5,9	3,6	2,1	2,9
7...	— 0,8	— 2,7	1,2	— 2,1	8,0	13,5	24,1	20,0	16,6	15,3	23,6	20,3	10,7	10,4	16,4	14,9	1,9	0,9	—4,6	4,1	1,3	3,3	0,3	1,5
8...	— 0,8	— 1,7	1,5	0,5	11,6	11,5	23,5	18,7	13,7	11,8	24,9	20,3	8,0	12,4	18,3	15,3	0,9	1,0	0,1	4,8	2,1	4,6	—4,4	3,0
9...	— 2,4	— 0,8	2,2	0,2	11,7	13,6	22,0	17,5	16,3	13,1	23,8	20,7	8,0	12,7	17,7	15,4	—1,6	2,0	—1,9	4,5	3,2	3,1	—4,7	2,3
10...	2,1	0,2	4,6	5,3	11,8	13,1	24,9	21,0	16,2	13,3	19,6	16,4	8,7	12,2	16,7	14,8	1,9	0,7	—1,3	3,9	2,9	3,2	—3,5	1,9
11...	2,9	5,0	7,3	6,7	11,7	16,8	24,3	17,0	13,0	10,7	20,0	16,5	8,8	12,8	16,7	13,9	—2,1	0,6	—5,1	7,3	2,3	3,5	—4,0	3,0
12...	52	5,4	10,0	7,6	10,7	8,9	12,8	8,7	14,9	12,4	20,8	16,7	12,6	11,0	16,5	13,4	—0,2	2,4	1,8	4,1	2,5	4,1	1,6	3,1
13...	2,5	6,9	6,9	4,7	8,0	4,9	15,1	11,2	12,4	11,7	21,6	18,7	7,5	9,9	15,5	12,5	—3,4	2,2	3,1	3,9	0,7	2,9	—2,4	3,0
14...	4,4	4,4	6,5	5,4	8,1	9,2	15,7	10,5	13,8	12,2	17,9	14,0	8,5	10,4	12,6	9,4	0,0	1,1	—1,1	5,2	1,6	3,9	—1,9	3,2
15...	6,9	4,8	7,8	4,7	10,2	9,9	14,1	11,3	13,6	11,4	19,7	15,2	8,5	4,0	11,6	7,9	2,1	3,1	—0,3	2,8	2,2	4,5	4,5	3,7
16...	5,7	4,1	8,0	5,7	11,3	8,5	17,0	13,3	13,7	11,5	20,7	16,9	6,0	4,3	10,5	7,1	1,6	2,3	2,8	3,7	2,2	3,8	1,7	3,4
17...	8,2	6,7	10,2	7,9	9,3	6,6	13,2	10,0	16,8	14,2	19,3	16,2	3,6	2,7	8,3	4,9	1,5	2,3	2,7	3,2	2,6	3,1	0,9	3,4
18...	11,1	9,2	6,2	3,2	7,8	6,3	13,1	10,8	14,7	12,1	19,0	15,4	1,6	4,3	6,6	2,6	1,9	3,0	1,5	2,3	2,6	3,6	2,7	4,0
19...	5,4	4,3	8,4	5,2	8,1	6,8	14,1	11,8	12,6	10,2	18,7	15,2	4,5	4,1	9,9	7,5	1,1	3,2	1,3	2,3	2,4	3,5	0,4	2,4
20...	8,1	5,6	8,2	5,6	9,8	6,5	14,9	10,0	11,7	10,4	20,2	16,8	6,6	4,6	10,3	8,7	2,5	2,6	3,3	4,9	1,3	3,4	2,0	1,6
21...	5,8	5,1	10,0	7,1	8,1	4,8	10,9	6,4	15,5	15,6	21,3	22,2	6,1	4,8	13,8	10,5	0,7	2,9	3,3	4,5	—0,1	4,1	1,3	3,3
22...	7,3	5,0	8,8	5,7	6,6	4,5	12,5	8,1	14,7	14,7	27,7	24,2	9,4	7,9	16,5	12,7	2,3	3,1	2,1	4,4	0,0	3,5	1,5	3,8
23...	4,8	1,6	6,2	2,8	5,0	5,6	18,9	15,3	21,7	19,2	23,8	23,3	13,4	11,0	16,7	13,8	3,2	3,4	—0,6	3,6	2,5	0,5	2,4	2,9
24...	— 0,3	— 0,5	3,6	0,9	8,5	7,2	17,9	13,3	17,8	17,6	27,0	24,6	10,0	12,7	14,7	12,9	0,2	2,7	1,3	4,6	0,2	2,4	—2,7	1,8
25...	— 0,1	— 1,2	4,9	2,0	8,3	12,8	17,9	14,4	16,9	14,8	23,0	19,3	12,1	9,7	12,7	10,6	1,1	2,9	—4,5	3,5	2,1	3,7	2,4	2,1
26...	0,1	— 1,5	5,7	2,5	11,0	8,8	18,5	14,5	14,8	12,8	21,1	17,8	10,6	8,7	14,7	11,4	1,6	3,2	2,2	4,0	2,0	3,3	1,9	3,3
27 ..	3,9	3,0	6,7	3,8	9,8	7,1	15,3	11,0	13,6	17,1	22,5	19,6	12,6	10,7	13,2	11,8	0,9	2,9	2,7	4,3	—3,5	2,9	1,9	1,4
28...	7,2	4,9	7,9	4,7	7,1	4,5	15,0	10,5	15,9	17,9	26,1	23,1	10,8	8,3	14,6	12,0	2,3	3,2	2,6	4,5	—2,0	3,0	2,5	2,6
29...	1,8	0,7	7,3	4,6	9,1	6,1	11,9	7,5	17,0	20,5	18,5	15,6	10,7	8,7	16,0	12,8	1,1	2,7	3,0	4,4	—3,5	2,9	2,0	3,2
30...	4,0	2,6	8,8	5,8	4,9	5,8	18,2	13,3	14,6	11,5	17,3	14,5	13,0	10,5	15,6	12,3	1,4	3,0	0,9	4,9	3,1	2,8	2,5	3,3
31...	9,9	8,1	8,5	5,8	»	»	»	»	14,2	12,7	22,0	18,2	12,0	13,0	17,1	15,1	1,8	2,7	»	»	1,5	3,8	—1,0	2,0
					Nombre des inversions												6	0	14	0	8	0	9	0
					Moyenne en cas d'inversion												—1,66	»	—2,66	»	—3,43	»	—2,81	»
					Moyenne en cas normaux												1,67	2,36	2,12	4,07	1,96	3,43	2,06	2,84
					Moyenne du mois												1,02	2,36	—0,11	4,07	0,57	3,43	0,05	2,84

I. *Examen des différences entre le sol et le sommet.*

Sans vouloir généraliser les conclusions auxquelles conduirait ce tableau, qui se rapporte à une année seulement, on peut y faire les remarques suivantes :

1° Les inversions de température se produisent surtout le matin; leur nombre est de 6 en janvier, 14 en avril, 8 en juillet et 9 en octobre, soit au total 33 sur 123 observations du matin, soit 27 p. 100.

2° Comme valeur de ces inversions, c'est en juillet qu'on rencontre les plus fortes (5,9 et 6,8) et en janvier les moindres : leur valeur relative correspond bien aux moyennes : janvier 1,66; avril 2,66; juillet 3,43 et octobre 2,81, donnant une moyenne générale de 2,70.

3° Les différences normales sont toujours plus fortes l'après-midi que le matin; leurs maxima moyens d'après-midi sont de 3° en janvier, 4° à 5° en avril (exceptionnellement 7°), de même en juillet, et de 3° à 4°

(1) A titre de renseignements, nous donnons ci-inclus le tableau des températures représentant la *normale* de Paris. Ce tableau donne la moyenne par jour pendant la période de 1841 à 1890, et pour chacun des quatre mois considérés. Ce tableau peut être utile pour des comparaisons, si l'on voulait étudier les variations en partant de ces normales.

Température normale de Paris (1841-1890).

DATES.	JANVIER.	AVRIL.	JUILLET.	OCTOBRE.	DATES.	JANVIER.	AVRIL.	JUILLET.	OCTOBRE.	DATES.	JANVIER.	AVRIL.	JUILLET.	OCTOBRE.
1	2,0	7,7	17,7	12,3	11	2,0	8,9	18,1	10,8	21	2,1	10,2	18,3	9,1
2	2,0	7,8	17,7	12,2	12	2,0	9,1	18,2	10,6	22	2,2	10,3	18,3	9,0
3	2,0	8,0	17,8	12,0	13	2,0	9,2	18,2	10,4	23	2,2	10,5	18,4	8,8
4	2,0	8,1	17,8	11,9	14	2,0	9,3	18,2	10,3	24	2,2	10,6	18,4	8,7
5	2,0	8,2	17,9	11,7	15	2,0	9,5	18,2	10,1	25	2,3	10,7	18,4	8,5
6	2,0	8,3	17,9	11,6	16	2,0	9,6	18,3	9,9	26	2,3	10,9	18,4	8,4
7	2,0	8,5	18,0	11,4	17	2,0	9,7	18,3	9,8	27	2,3	11,0	18,3	8,2
8	2,0	8,6	18,0	11,2	18	2,1	9,8	18,3	9,6	28	2,4	11,1	18,3	8,0
9	2,0	8,7	18,1	11,1	19	2,1	10,0	18,3	9,5	29	2,4	11,2	18,3	7,9
10	2,0	8,8	18,1	10,9	20	2,1	10,1	18,3	9,3	30	2,5	11,4	18,3	7,7
										31	2,5	»	18,3	7,6

en octobre. — La moyenne de l'après-midi pour les quatre mois est de 3,17 contre 1,94 le matin.

Si l'on compare ces résultats avec les moyennes horaires du résumé des cinq années, qui figurent parmi les chiffres des tableaux précédents, on voit que :

1° En tenant compte des moyennes horaires, il n'y a aucune inversion constatée (sauf une très faible en avril);

2° Comme valeur, la comparaison entre les chiffres de 1894 et ceux du Résumé donne :

MOIS.	OBSERVATIONS DU MATIN		OBSERVATIONS DE L'APRÈS-MIDI	
	EN 1894.	D'APRÈS LE RÉSUMÉ.	EN 1894.	D'APRÈS LE RÉSUMÉ.
Janvier	−1,66 / 1,67 Moy. 1,02	0,75	2,36	2,37
Avril	−2,66 / 2,12 Moy. −0,11	−0,05	4,07	4,08
Juillet	−3,43 / 1,96 Moy. 0,57	0,72	3,43	3,78
Octobre	−2,81 / 2,06 Moy. 0,63	0,17	2,81	2,99

Les chiffres des moyennes ne diffèrent les uns des autres que par des dixièmes de degré, aussi bien pour une année seule que pour la moyenne des cinq, ce qui établit une concordance complète.

Mais ce que les derniers tableaux établissent en plus, c'est le régime très intéressant des inversions, lesquelles apparaissent dans tous les mois considérés avec une certaine régularité.

II. *Différence de l'amplitude des variations diurnes de température entre le sol et le sommet.*

Ces amplitudes, qui sont les différences entre le maximum et le minimum de chaque jour pour le Bureau central météorologique et la Tour, sont portées dans les registres du Bureau et sont notées d'après les minima du matin et les maxima de l'après-midi, fournis par les courbes des enregistreurs.

Le tableau suivant donne ces amplitudes pour tous les jours des quatre mois considérés.

Amplitude des variations diurnes du sol et du sommet.

DATES DU MOIS.	JANVIER.						AVRIL.						JUILLET.						OCTOBRE.					
	B. C. M.			T. E.			B. C. M.			T. E.			B. C. M.			T. E.			B. C. M.			T. E.		
	MIN.	MAX.	AMPL.	MIN.	MAX.	AMPL.	MIN.	MAX.	AMPL.	MIN.	MAX.	AMPL.	MIN.	MAX.	AMPL.	MIN.	MAX.	AMPL.	MIN.	MAX.	AMPL.	MIN.	MAX.	AMPL.
1	− 5,0	2,4	7,4	− 3,7	1,3	5,0	9,0	21,1	12,1	10,6	15,8	5,2	16,9	32,1	15,2	20,0	27,7	7,7	6,5	14,1	7,6	4,4	10,0	5,6
2	− 0,8	1,7	2,5	− 2,7	− 2,1	0,6	7,7	20,4	12,7	10,3	16,3	6,0	18,3	30,6	12,3	22,2	26,7	4,5	8,2	14,8	6,6	5,5	10,4	4,9
3	− 6,9	−3,6	3,3	−10,1	− 6,6	3,5	7,0	21,2	14,2	9,3	17,9	8,6	15,0	22,0	7,0	11,6	17,4	5,8	9,3	13,5	4,2	6,0	10,4	4,4
4	−10,7	−9,5	1,2	−13,8	−12,7	1,1	9,5	20,4	10,9	10,0	17,2	7,2	12,7	22,5	9,8	10,8	19,1	8,3	8,6	11,9	3,3	5,3	9,6	4,3
5	−12,5	−3,9	8,6	−15,6	− 4,9	10,7	10,7	22,6	11,9	10,7	18,6	7,9	13,7	27,2	13,5	14,3	23,2	8,9	9,1	13,3	4,2	6,4	10,0	3,6
6	− 4,1	1,0	5,1	− 7,0	0,1	7,1	10,6	21,8	14,2	13,9	21,1	7,2	15,8	32,7	16,9	19,8	29,6	9,8	10,1	13,5	3,4	8,0	10,5	2,5
7	− 0,9	1,3	2,2	− 2,8	− 0,5	2,3	8,9	24,7	15,8	13,0	20,3	7,3	16,5	24,7	8,2	13,6	21,2	7,6	10,7	17,3	6,6	9,0	15,4	6,4
8	− 1,9	1,8	3,7	− 2,5	1,5	4,0	11,0	23,7	12,7	11,3	18,9	7,6	13,7	25,0	11,3	11,6	20,8	9,2	7,9	18,7	10,8	11,9	15,5	3,6
9	− 2,5	3,3	5,8	− 1,7	4,3	6,0	11,5	22,7	11,2	13,1	18,8	5,7	14,7	24,6	9,9	11,2	20,9	9,7	8,0	18,2	10,2	12,2	15,4	3,2
10	1,3	5,5	4,2	0,1	10,4	10,3	11,4	24,9	13,5	11,6	22,5	10,9	16,0	20,8	4,8	13,2	17,4	4,2	8,2	16,7	8,5	11,6	16,0	4,4
11	2,0	7,7	5,7	4,6	11,0	6,4	11,2	25,7	14,5	14,2	21,3	7,1	12,8	21,5	8,7	9,5	17,2	7,7	8,8	16,7	7,9	11,6	14,4	2,8
12	3,0	10,0	7,0	4,0	8,1	4,1	10,4	15,2	14,8	7,9	10,5	2,6	14,3	21,0	6,7	11,4	17,2	5,8	12,2	16,5	4,3	9,9	13,9	4,0
13	2,0	6,9	4,9	3,5	9,4	5,9	7,9	15,7	7,8	4,5	11,8	7,3	12,0	22,8	10,8	10,2	19,2	9,0	6,4	15,9	9,5	8,6	13,1	4,5
14	4,1	7,2	3,1	3,7	9,8	6,1	8,1	17,5	9,4	6,9	13,3	6,4	13,5	19,4	5,9	11,5	15,4	3,9	7,8	14,2	6,4	9,3	10,8	1,5
15	6,1	9,1	3,0	4,3	5,6	1,3	9,8	14,2	4,4	8,3	11,5	3,2	12,4	21,0	8,6	10,9	16,3	5,4	5,5	11,6	6,1	3,6	8,3	4,7
16	5,0	8,1	3,1	3,4	6,4	3,0	10,8	17,5	6,7	8,0	13,5	5,5	13,0	21,0	8,0	10,5	17,3	6,8	5,0	10,7	5,7	3,9	7,7	3,8
17	7,6	11,5	3,9	6,1	9,3	3,2	9,0	16,9	7,9	6,5	12,3	5,8	16,6	20,5	3,9	14,0	17,2	3,2	3,2	8,6	5,4	1,5	5,6	4,1
18	6,0	7,3	1,3	2,9	9,6	6,7	7,8	16,0	8,2	6,2	11,9	5,7	14,5	21,4	6,9	11,9	17,3	5,4	1,6	6,7	5,1	3,2	5,1	1,9
19	5,1	8,6	3,5	3,8	5,9	2,1	8,1	15,7	7,6	6,4	12,5	6,1	12,5	19,8	7,3	10,0	15,9	5,9	3,6	10,7	7,1	1,9	8,2	6,3
20	7,1	8,5	1,4	5,1	6,1	1,0	9,3	15,0	5,7	6,3	11,0	4,7	11,7	20,2	8,5	10,1	17,4	7,3	6,6	11,4	4,8	3,9	10,4	6,5
21	5,5	10,1	4,6	4,1	7,3	3,2	8,0	11,1	3,1	4,4	6,6	2,2	15,5	27,1	11,6	14,1	22,6	8,5	6,1	14,3	8,2	4,6	11,1	6,5
22	7,1	8,9	1,8	4,2	6,2	2,0	6,0	13,6	7,6	4,1	8,4	4,3	14,7	27,8	13,1	13,1	24,9	11,8	8,9	16,5	7,6	7,0	14,1	7,1
23	4,3	6,6	2,3	1,5	3,3	1,8	5,0	19,5	14,5	5,2	16,3	11,1	19,8	28,7	8,9	18,7	26,1	7,4	12,8	17,6	4,8	10,9	14,3	3,4
24	− 0,9	3,8	4,7	− 0,9	1,8	2,7	8,5	18,4	9,9	5,7	14,3	8,6	17,8	28,8	11,0	16,6	25,3	8,7	9,8	15,4	5,6	11,0	14,2	3,2
25	− 0,2	5,1	5,3	− 1,9	2,1	4,0	8,3	20,9	12,6	11,2	15,7	4,5	16,9	23,9	7,0	14,8	20,2	5,4	10,8	13,6	2,8	9,2	11,2	2,0
26	0,1	5,8	5,7	− 2,1	3,6	5,7	11,0	19,9	8,9	8,8	16,1	7,3	14,8	22,7	7,9	12,1	18,6	6,5	10,3	14,7	4,4	8,6	13,5	4,9
27	2,4	7,6	5,2	1,7	5,0	3,3	9,0	16,2	7,2	5,9	12,2	6,3	13,6	23,5	9,9	15,0	20,1	5,1	12,2	16,2	4,0	10,3	13,3	3,0
28	6,9	8,5	1,6	4,8	5,8	1,0	6,9	16,0	9,1	4,4	11,4	7,0	15,9	27,2	11,3	16,9	24,4	7,5	10,3	14,7	4,4	8,2	12,3	4,1
29	1,2	7,3	6,1	− 0,2	4,8	5,0	8,8	14,2	5,4	5,0	9,3	4,3	16,8	25,8	9,0	18,1	22,5	4,4	9,3	16,0	6,7	8,3	13,1	4,8
30	2,9	9,4	6,5	2,0	7,3	5,3	4,9	18,4	13,5	5,3	13,7	8,4	14,6	18,4	3,8	11,4	16,3	4,9	12,6	16,4	3,8	10,0	13,4	3,4
31	6,2	10,2	4,0	5,0	8,3	3,3	»	»	»	»	»	»	14,2	22,1	7,9	12,3	10,0	6,7	11,6	17,3	5,7	11,2	15,2	4,0
Maximum.			8,6			10,7			15,8			10,9			16,9			11,8			10,8			7,1
Minimum.			1,2			0,6			3,1			2,2			3,8			3,2			2,8			1,5
Moyenne..			4,15			4,12			9,93			6,19			9,21			6,87			5,99			4,17

Il résulte de ce tableau que d'une manière générale la température est beaucoup moins variable au sommet de la Tour qu'au niveau du sol, ainsi que nous l'avons déjà vu.

Cette différence est surtout marquée en avril, où l'on rencontre des amplitudes de 14°,8 au Bureau central météorologique et 2°,6 à la Tour, soit une différence de 12°,2; 15°,8 au Bureau central météorologique et 7°,3 à la Tour, soit une différence de 8°,5, etc... De même en juillet, où ces différences atteignent 7°,8, 7°,1, etc. Elles sont moindres en octobre et très faibles en janvier. Les moyennes de ces différences sont résumées par le tableau qui suit :

DÉSIGNATION.	JANVIER.	AVRIL.	JUILLET.	OCTOBRE.
Bureau central.....	4,15	9,93	9,21	5,90
Tour.....	4,12	6,19	6,87	4,17
Différence.....	0,03	3,74	2,34	1,82

Celles qui sont portées au Mémoire Résumé des moyennes de cinq années s'en écartent notablement ; elles figurent dans le tableau comparatif suivant :

DÉSIGNATION.	JANVIER.	AVRIL.	JUILLET.	OCTOBRE.
Bureau central.....	2,75	9,26	7,88	5,61
Tour.....	1,31	5,12	4,98	2,78
Différence.....	1,44	4,14	2,90	2,83

Ce phénomène est donc assez variable d'une année à l'autre en valeur absolue, et paraît beaucoup moins constant que celui des différences de température entre le sol et le sommet.

§ 5. — Observations des températures de 1890 à 1893.

Nous retrouvons des conclusions tout à fait analogues à celles que nous a fourni l'examen détaillé de l'année 1894, en prenant les résultats généraux des années 1890 à 1893 que nous résumons dans les tableaux ci-dessous :

Nombre des inversions de température.

ANNÉES.	MATIN.				SOIR.				TOTAL.		PROPORTION O/O DES INVERSIONS DU MATIN.
	JANVIER.	AVRIL.	JUILLET.	OCTOBRE.	JANVIER.	AVRIL.	JUILLET.	OCTOBRE.	MATIN.	SOIR.	
1890.....	6	7	6	14	1	0	0	0	33	1	27
1891.....	11	9	10	9	5	0	0	0	39	5	32
1892.....	7	15	11	12	2	0	0	0	45	2	37
1893.....	10	21	10	13	2	0	0	0	54	2	44
Totaux.....	34	52	37	46	10	0	0	0	171	10	
Moyennes.....	8,5	12,3	9,2	11,5	8,5	0	0	0	43	2	

Différences maxima entre la base et le sommet (Les signes — correspondent aux inversions).

ANNÉES.	MATIN.								SOIR.							
	JANVIER.		AVRIL.		JUILLET.		OCTOBRE.		JANVIER.		AVRIL		JUILLET.		OCTOBRE.	
	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−
1890.....	4,0	7,6	5,0	3,2	4,0	4,1	2,7	8,7	4,0	1,3	5,6	»	6,0	»	4,8	»
1891.....	3,9	8,4	3,2	2,7	2,8	4,2	3,7	3,8	3,5	5,4	5,0	»	5,5	»	5,2	»
1892.....	3,7	4,5	3,7	6,0	3,3	4,8	3,0	5,1	3,7	1,2	5,1	»	5,3	»	3,7	»
1893.....	4,0	6,0	2,7	9,1	3,4	4,4	2,4	3,5	3,8	1,4	5,6	»	4,5	»	3,8	»
Moyennes (1).....	3,9	6,37	3,65	5,25	3,37	4,42	2,95	5,27	3,75	2,32	5,32		5,32		4,37	

	Matin.	Soir.
Maximum moyen pour l'année.....	+ 3,47	+ 4,60
	— 5,33	— 2,32

(1) Ces moyennes, ainsi que celles des deux tableaux suivants, ne sont indiquées que comme une représentation numérique facilitant les comparaisons.

Différences moyennes entre la base et le sommet (Les signes — correspondent aux inversions).

ANNÉES.	MATIN.								SOIR.								MOYENNES.			
	JANVIER.		AVRIL.		JUILLET.		OCTOBRE.		JANVIER.		AVRIL.		JUILLET.		OCTOBRE.		MATIN.		SOIR.	
	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−	+	−
1890	2,40	3,20	2,13	1,19	2,54	2,97	1,50	3,88	2,93	1,30	3,91	»	4,17	»	3,34	»	2,14	2,81	3,57	1,30
1891	1,90	3,13	1,60	1,20	1,86	1,13	2,01	2,35	2,55	2,45	3,69	»	4,06	»	3,24	»	1,84	1,95	3,40	2,45
1892	2,09	2,50	1,90	2,03	1,83	1,55	1,64	1,49	2,79	0,65	4,15	»	4,04	»	2,09	»	1,87	1,89	3,42	0,65
1893	1,65	2,89	1,49	3,87	1,51	2,91	1,63	1,75	2,56	1,35	4,49	»	3,27	»	2,85	»	1,57	2,86	3,19	1,35
Moyennes	2,01	2,93	1,78	2,07	1,94	2,14	1,69	2,39	2,71	1,44	4,06		3,89		3,03					

Moyennes générales du mois..... Matin. + 1,85 / − 2,38 — Soir. + 3,42 / − 1,44

Amplitudes de température pour la base et le sommet (Chacune des moyennes ci-dessous est la moyenne des amplitudes du mois).

ANNÉES.	JANVIER.						AVRIL.						JUILLET.						OCTOBRE.					
	B. C. M.			T. E.			B. C. M.			T. E.			B. C. M.			T. E.			B. C. M.			T. E.		
	MIN.	MAX.	MOY.	MIN.	MAX.	MOY.	MIN.	MAX.	MOY.	MIN.	MAX.	MOY.	MIN.	MAX.	MOY.	MIN.	MAX.	MOY.	MIN.	MAX.	MOY.	MIN.	MAX.	MOY.
1890	1,2	9,2	4,78	0,9	12,0	4,15	1,2	15,5	8,75	1,0	11,4	6,64	1,8	15,9	9,47	4,1	11,4	7,08	3,2	15,5	8,48	1,7	8,5	4,84
1891	0,5	9,4	4,70	0,8	7,4	4,18	3,8	14,8	8,60	2,4	12,0	5,96	4,4	13,5	9,18	3,5	10,7	5,95	1,8	15,1	6,93	1,8	12,2	5,12
1892	1,2	7,4	3,96	0,7	12,5	3,87	3,6	16,6	10,93	3,2	11,3	7,23	5,1	15,2	10,77	4,2	13,4	8,21	1,0	11,0	5,63	0,3	14,8	4,62
1893	0,5	9,0	3,97	0,5	12,3	4,15	7,4	18,8	14,04	5,0	11,6	8,38	4,2	15,6	9,22	3,0	11,6	6,69	2,2	11,4	6,31	0,4	7,6	4,05
Moyennes			4,35			4,08			10,58			7,05			9,66			6,98			6,84			4,65

Différence moyenne des amplitudes dans la base et le sommet..... .... 2°,17

L'examen de ces tableaux donne lieu aux remarques suivantes :

1° Les inversions se produisent à peu près uniquement le matin; leur nombre est maximum en avril et en octobre. En ne considérant que les observations du matin, le rapport du nombre des inversions au nombre total des observations a été au minimum de 27 et s'est élevé jusqu'à 44 p. 100.

C'est donc un phénomène d'une extrême fréquence.

2° Le maximum des différences entre la base et le sommet est compris dans le cas normal, et pour le matin, entre 3° et 4°; pour le soir, entre 4° et 5°.

Dans le cas d'inversion, le maximum du matin est compris entre 4° et 6°, c'est-à-dire que la différence de température est dans ce cas notablement plus forte que la différence positive normale.

3° Quant aux différences moyennes, elles sont de 2° dans le cas normal et pour le matin ; pour le soir, elles sont comprises entre 3° et 4°.

Dans le cas d'inversion, la moyenne du matin est comprise entre 2° et 3°, c'est-à-dire nettement supérieure à la différence positive dans le cas normal ; pour le soir, l'inversion est négligeable en raison de sa rareté.

4° Enfin, quant aux amplitudes journalières de la température au Bureau central et au sommet de la Tour, nous reconnaissons comme précédemment que ces amplitudes sont beaucoup moindres au sommet qu'au niveau du sol ; la différence moyenne est de 2°,17 : elle est maximum en avril où elle atteint 3°,53.

§ 6. — Observations spéciales de températures et de vents.

M. Barbé, aide-météorologiste au Bureau central météorologique, nous a communiqué les très intéressants documents suivants sur certains cas particuliers de température et de vent.

I. — Température.

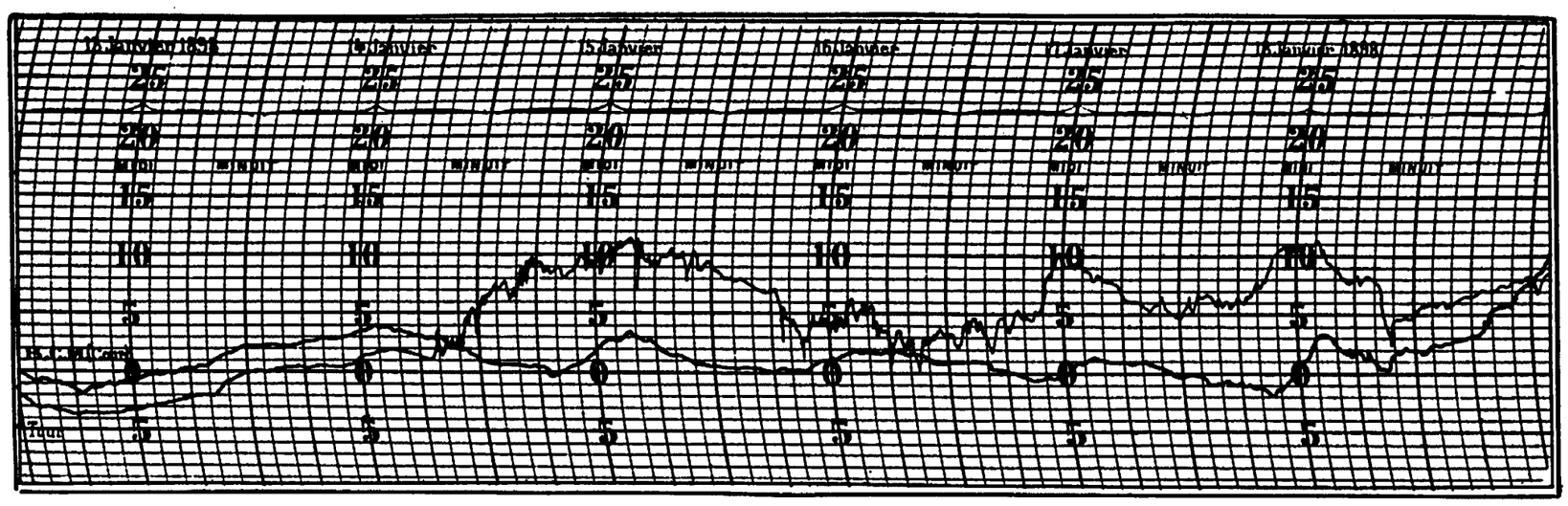


Fig. 203. — Inversion de température du mois de janvier 1898.

La figure 203 représente la marche de la température pendant une période de six jours consécutifs, du 13 au 18 janvier 1898.

Pendant toute cette période, le baromètre est resté très élevé (776 à 778 *mm* au niveau de la mer); le temps était constamment couvert ou brumeux en bas et le sommet de la Tour resta complètement invisible du Bureau météorologique. Le vent, très faible d'entre N. et E., tourne légèrement au S.-S.-O. et au S.-O., tout en restant très faible en haut et en bas, du matin du 17 jusqu'au 18 inclus; il ne s'établit bien franchement des régions O. qu'à partir du 19.

Le 13, il gèle en haut et en bas, et tous les thermomètres de la Tour sont recouverts de givre. Le 15, l'inversion commence; le brouillard ne s'élève plus que jusqu'à près de 200 *m*, et l'observateur placé au sommet de la Tour, et même seulement à la plate-forme intermédiaire, jouit du soleil et d'un ciel remarquablement pur; il en est de même les 17 et 18 janvier. L'inversion atteint alors son maximum (près de 12° à 10 heures du matin le 18 janvier).

Chose remarquable, l'amplitude de la variation diurne est plus grande au sommet de la Tour que dans la cour du Bureau central près du sol. Elle atteint 6°,7 à la Tour et seulement 5° dans la cour le 18 janvier.

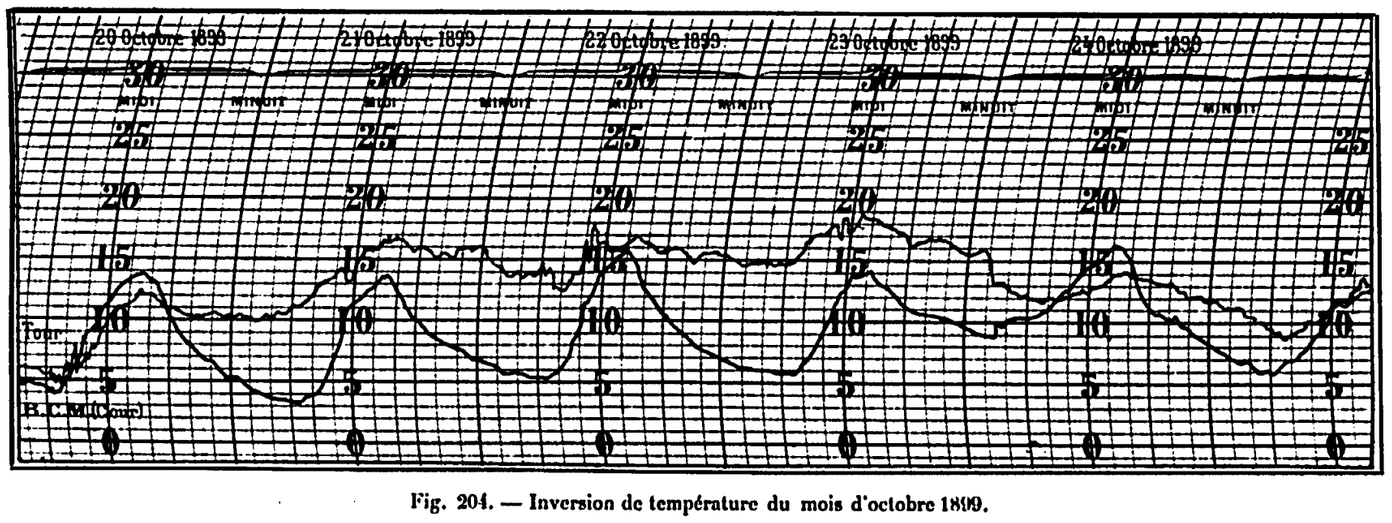


Fig. 204. — Inversion de température du mois d'octobre 1899.

La courbe de la figure 204 est plus récente et montre une inversion remarquable qui s'est produite du 20 au 25 octobre 1899. Elle correspond de même à une période de hautes pressions (773 à 770 *mm* au niveau de la mer) à des vents calmes ou faibles des régions E. qui amènent des brumes et des brouillards à Paris. Pendant le jour, la brume peu épaisse permet l'échauffement des régions inférieures par l'action des rayons solaires et la variation diurne est assez prononcée près du sol; elle dépasse 10° le 22 octobre. L'inversion est maxima vers 7 heures du matin le 23; elle prend fin le 25 au matin où le vent tourne au S.-E. pour atteindre le S.-O. le 27.

Ces inversions de janvier 1898 et octobre 1899 précèdent toutes deux un changement de temps qui se manifeste au sol quand l'inversion prend fin. On note en effet de la pluie le 19, puis le 21 janvier 1898; des gouttes de pluie le 21 et du brouillard et de la pluie le 27 octobre 1899.

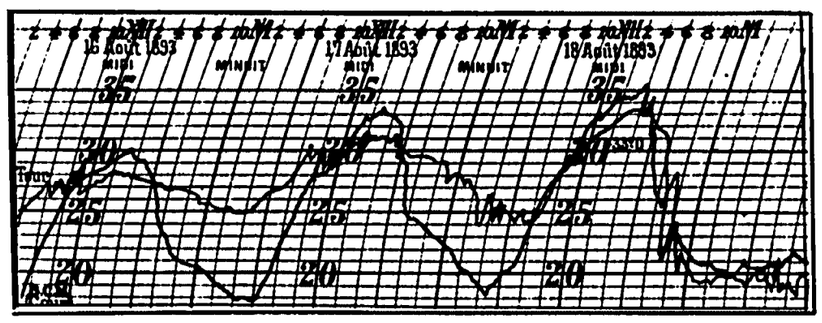


Fig. 205. — Maxima de température, août 1893.

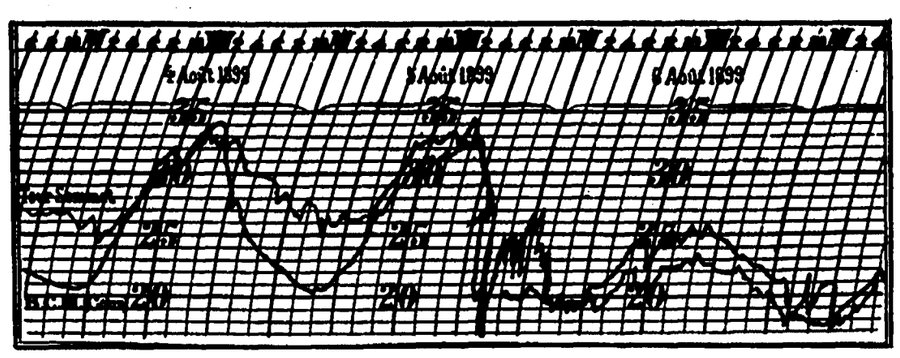


Fig. 206. — Maxima de température, août 1899.

Les courbes des figures 205 et 206 représentent les variations de la température aux dates où elle a été le plus élevée au sommet de la Tour.

Le 18 août 1893 et le 4 août 1899, elle atteint 33°,0.

Dans la cour du Bureau météorologique, elle atteignait respectivement, le 18 août 1893, 35°,8, et le 4 août 1899, 34°,1; elle arrivait encore à 31°,2 le 5 août 1899. Ces valeurs furent dépassées dans la cour du Bureau, mais la température de la Tour n'atteignit pas 33°,0.

La période de chaleurs du mois d'août 1893, qui correspondait à un état orageux de l'atmosphère, avec pression moyenne, s'est terminée, en effet, par un orage qui a éclaté vers 6ʰ35ᵐ du matin, le 19 août.

La période chaude du mois d'août 1899 a été brusquement interrompue par un orage violent qui a éclaté à 8ʰ30ᵐ du soir environ, le 5 août. De nombreux éclairs très intenses sillonnèrent le ciel toute la nuit, et la pluie tomba avec abondance.

La température, qui avait commencé à baisser lorsque le ciel commençait à se couvrir, tombe brusquement de 26°,7 à 16°,3 au sommet de la Tour, et de 26°,8 à 19,8° seulement dans la cour du Bureau météorologique.

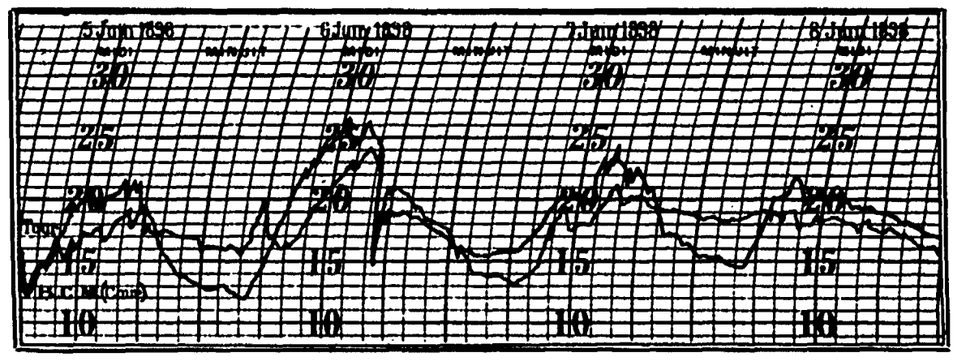


Fig. 207. — Abaissement brusque de température, juin 1898.

Un autre exemple d'abaissement brusque de la température sous l'action de la pluie est donné par la courbe de la figure 207, mais avec une importance moins grande. Il est à remarquer que la pluie, qui a troublé complètement la marche diurne de la température dans la cour du Bureau, paraît n'avoir influencé celle de la Tour que pendant moins de deux heures; en effet, la courbe reprend à ce moment son allure normale, créant ainsi une inversion qui dure jusqu'à minuit.

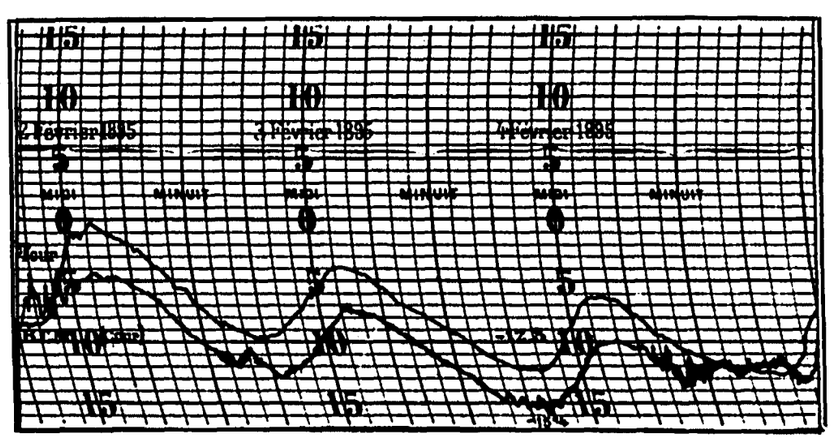


Fig. 208. — Minima de température, février 1895.

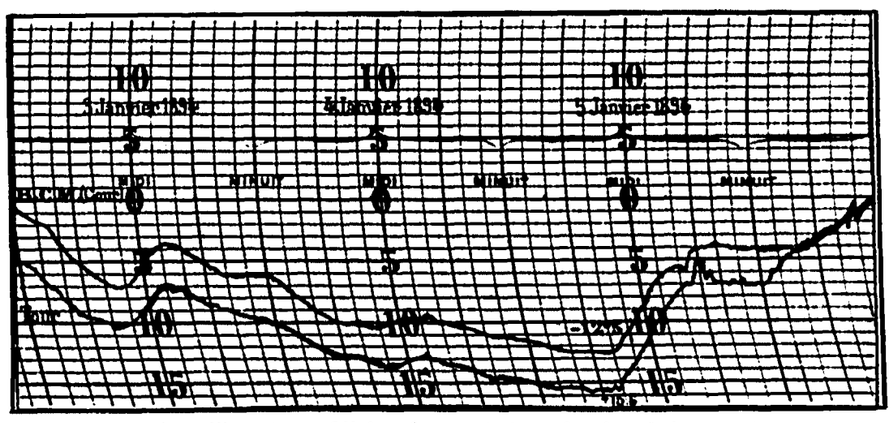


Fig. 209. — Minima de température, janvier 1894.

Les courbes des figures 208 et 209 représentent les variations de la température pendant les jours où elle a atteint ses points les plus bas à la Tour Eiffel-sommet, — 15°,4 le 4 février 1895 et — 15°,6 le 5 janvier 1894.

Dans la cour du Bureau météorologique, elle n'atteint que — 12°,3 le 4 février 1895 et — 12°,5 le 5 janvier 1894.

Pendant ces deux périodes, il n'y a pas d'inversion de température et la variation diurne paraît la même en haut et en bas. Seuls, les minima au sommet de la Tour sont un peu en retard sur ceux de la cour.

Il est à remarquer que dans toutes les parties de courbes que nous donnons ici, sauf quelques rares exceptions, comme celles des 3 et 4 février 1895, des 3, 4 et 5 janvier 1894, l'inversion de température entre le sommet et la cour est nettement marquée pendant la nuit. Il fait beaucoup plus chaud au sommet de la Tour que près du sol où l'abaissement de la température pendant la nuit est beaucoup plus grand, ainsi que l'échauffement pendant le jour.

II. — Vitesse et direction du vent.

Nous donnons ci-dessous quelques courbes de vitesses moyennes du vent (1) et les directions correspondantes relevées d'heure en heure, obtenues par les anémomètres Richard installés au sommet de la Tour, à 305 *m* au-dessus du sol, et sur la terrasse du Bureau météorologique, à 20,9 *m* seulement, mais dans une situation suffisamment dégagée par rapport aux maisons environnantes.

Nous y avons joint les parties de quelques courbes de vitesse absolue du vent au sommet de la Tour lorsque cette vitesse a atteint quelques valeurs remarquables.

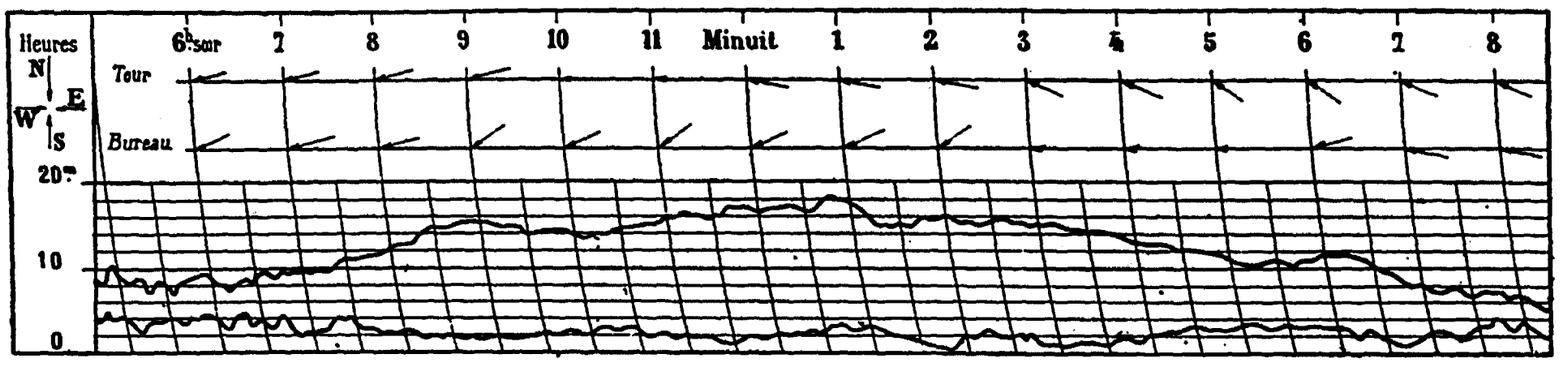


Fig. 210. — Écarts de direction et de vitesse du vent entre la Tour et le Bureau central, juin 1897.

Les courbes de la figure 210 montrent nettement les écarts qui peuvent exister entre les vitesses et les directions du vent près du sol et à une hauteur plus grande dans l'atmosphère.

Les 12 et 13 juin 1897, la pression barométrique était voisine de la normale quoique en baisse ; la température en hausse et le ciel sans nuages.

Les courbes des vitesses du vent à 305 *m* et près du sol sont irrégulières pendant le jour ; celle de la terrasse y atteint son maximum vers 5 heures de l'après-midi pendant que celle de la Tour est à son minimum ; elles deviennent toutes deux plus régulières la nuit, mais en s'écartant de plus en plus, la vitesse à la Tour atteignant son maximum (18 *m*) vers 1 heure du matin, tandis qu'à la terrasse elle devient presque nulle.

La direction du vent est pendant cette journée à la terrasse toujours à gauche de celle de la Tour.

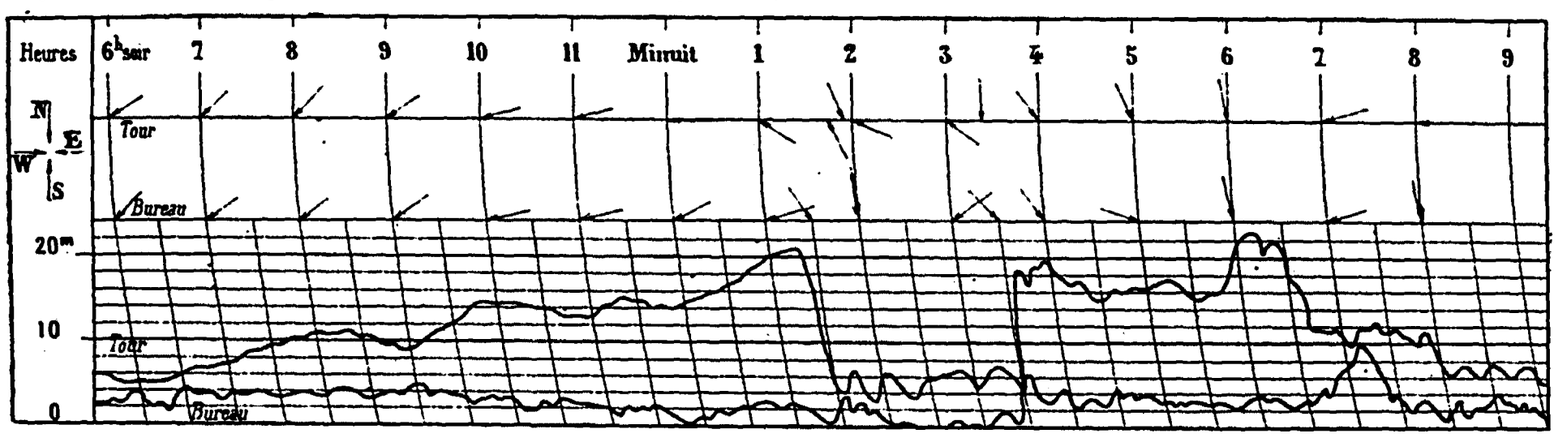


Fig. 211. — Écarts de direction et de vitesse du vent entre la Tour et le Bureau central, juillet 1899.

Les courbes de la figure 211 (21, 22 juillet 1899) présentent la même allure que celles de la figure 210 jusque près de 1h20m du matin, où la vitesse du vent à la Tour s'abaisse brusquement de 21 *m* à 4 *m* par seconde avec direction variable ; elle arrive même à 3h30m du matin à être inférieure à celle observée à la terrasse, où le vent s'est élevé quelques minutes plus tôt qu'à la Tour. Un coup de vent qui atteint 23 *m* par seconde se produit à la Tour à 6h15m du matin, au moment où éclate un orage sur Paris ; le coup de vent ne se produit à la terrasse qu'à 7h10m du matin et atteint seulement 10 *m* par seconde.

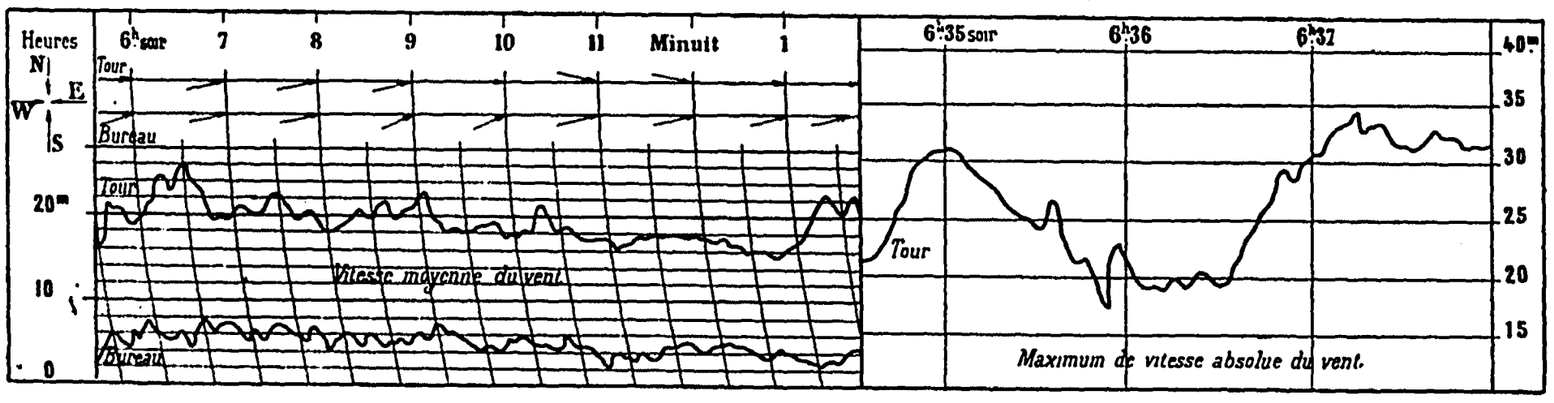


Fig. 212. — Orage du 18 juin 1897.

(1) Les vitesses en mètres par seconde correspondant aux différentes désignations du vent sont indiquées dans tous les aide-mémoire français.

Nous donnons ci-dessous celles usitées en Angleterre (*Quaterly journal of the Royal meteorological Society*, janvier 1899), d'après l'échelle de Beaufort. (L'anémomètre actuellement préféré pour les expériences de cette nature est l'anémomètre à *pression*, de M. W.-H. Dines [*Quaterly journal*, vol. XIX, p. 19].)

ÉCHELLE DE BEAUFORT.	DÉSIGNATION DU VENT.	VITESSE EN MILLES (1609,31 *m*) PAR HEURE.	VITESSE EN KILOMÈTRES PAR HEURE.	VITESSE EN MÈTRES PAR SECONDE.
0	Calme	0	0	0
1	Light airs (petite brise)	3	4,8	1,33
2	Light breeze (légère brise)	9	14,5	4,00
3	Moderate breeze (brise modérée)	16	25,7	7,1
4	Fresh breeze (brise fraîche)	24	38,6	10,7
5	Strong breeze (forte brise)	34	54,7	15,3
6	Gale (vent très fort)	42	67,6	18,8
7	Strong gale (vent impétueux)	55	88,5	24,6
8	Hurricane (tempête)	70	112,7	31,3

(L'ouragan commence à une vitesse de 40 *m* ; il atteint quelquefois 45 *m* au sommet de la Tour.)

Les courbes de la figure 212 correspondent à la journée orageuse du 18 juin 1897, où une trombe a ravagé la banlieue nord de Paris, du mont Valérien à la plaine Saint-Denis, en passant par Bois-Colombes, Asnières et Saint-Ouen. Le vent a atteint à 6ʰ32ᵐ du soir 28 *m* de vitesse moyenne à la Tour et seulement 7,8 *m* à la terrasse. L'enregistreur de vitesse absolue, dont nous donnons la partie la plus intéressante de la courbe, n'a pas accusé plus de 34 *m* par seconde, un peu après 6ʰ37ᵐ du soir. A quelques kilomètres de là, le vent démolissait des maisons et arrachait des peupliers de 20 *m* de hauteur.

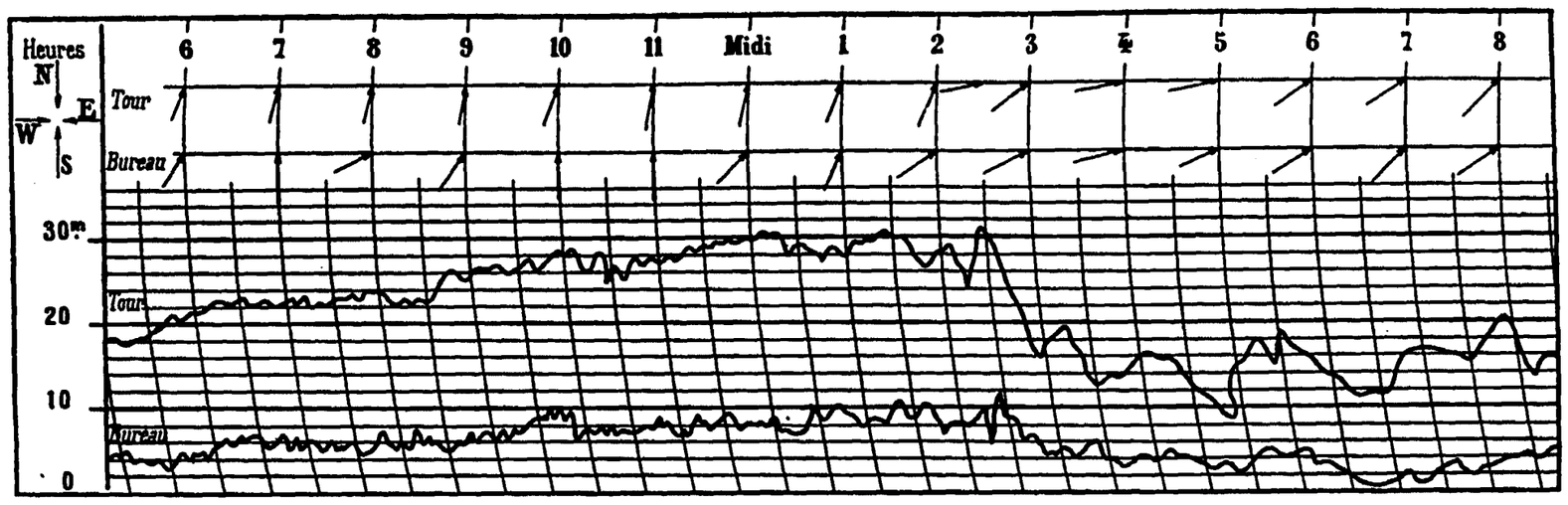


Fig. 213. — Tempête du 3 mars 1896.

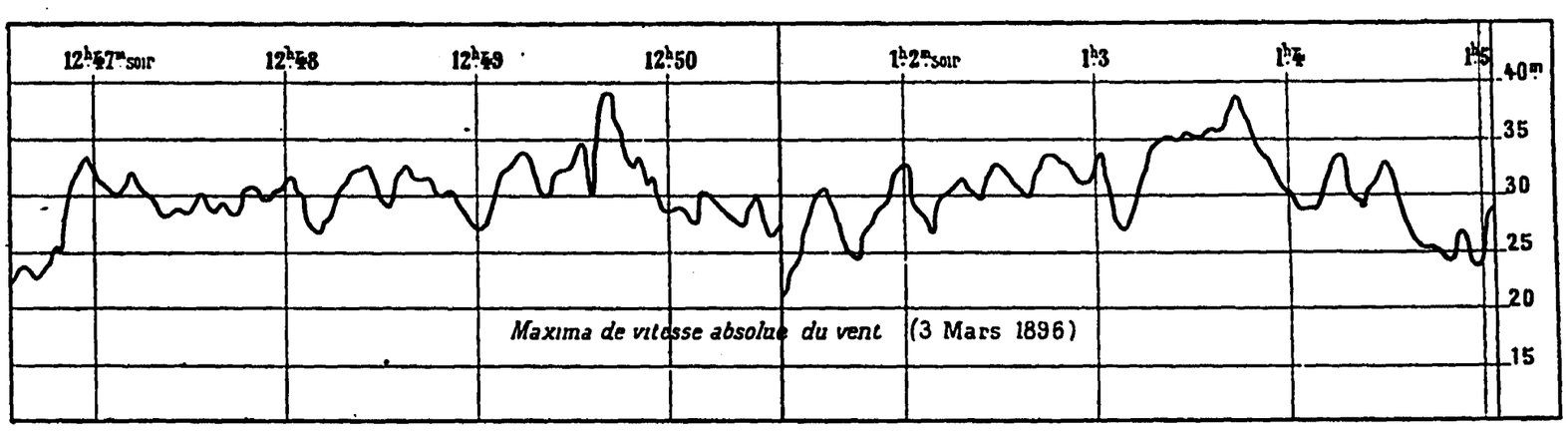


Fig. 214. — Tempête du 3 mars 1896.

Les courbes des figures 213 et 214 ont été obtenues dans la journée du 3 mars 1896 et correspondent à une dépression barométrique profonde (739 *mm*), occasionnée par le passage d'une violente bourrasque dont le centre se trouve le 3 sur le nord de l'Angleterre. Les courbes des vitesses moyennes sont à peu près parallèles; leurs maxima, 31,5 *m* à la Tour et 13,5 *m* à la terrasse, se produisent tous deux ensemble vers 2ʰ25ᵐ de l'après-midi. On a enregistré à la Tour deux coups de vent qui ont atteint la vitesse absolue de 39 *m* par seconde (fig. 214) vers 12ʰ50ᵐ et 1ʰ4ᵐ de l'après-midi.

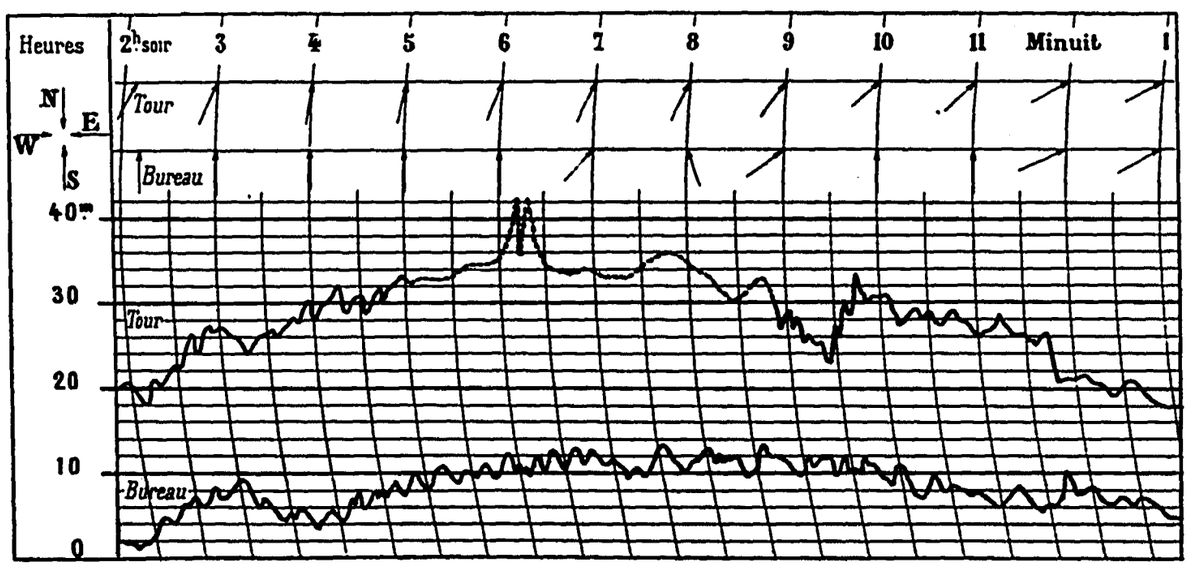


Fig. 215. — Tempête du 12 novembre 1894.

Les courbes de la figure 215 correspondent à une des plus violentes tempêtes qui aient sévi sur Paris depuis 1889, celle du 12 novembre 1894. A 7 heures du matin, le centre de la bourrasque se trouvait à l'entrée de la Manche où le baromètre avait baissé dans la nuit de 19 *mm* (I. Scilly, 732,5 *mm*); il atteignait le Danemark le 13 novembre à 7 heures du matin, après avoir fait sentir son action sur toute l'Europe occidentale et particulièrement sur le nord et le centre de la France. Le vent a atteint deux fois à la Tour la vitesse moyenne de 42 *m* par seconde à 6ʰ13ᵐ et 6ʰ18ᵐ du soir; il y a eu 13,7 à la terrasse du Bureau.

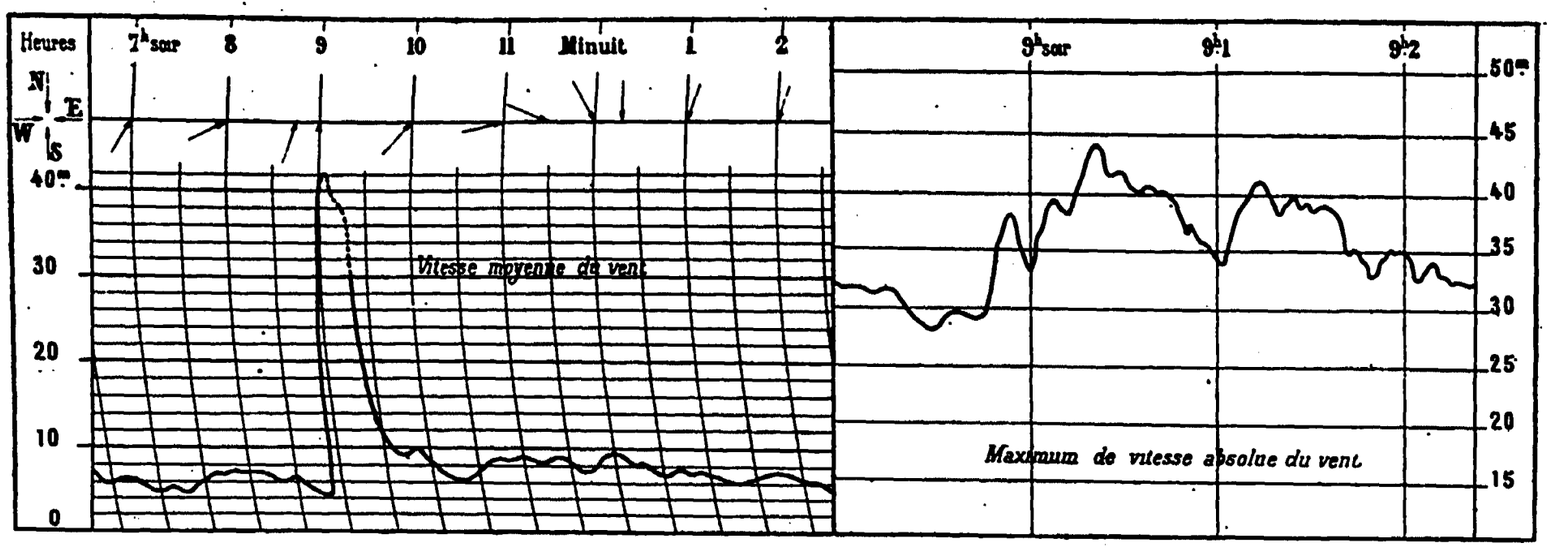


Fig. 216. — Orage du 6 septembre 1890.

Les courbes de la figure 216 ont été obtenues à l'anémomètre du sommet de la Tour pendant un violent orage qui a éclaté sur la région de Paris le 6 septembre 1890. Ce fut la plus grande manifestation d'une période orageuse qui dura du 5 au 10 septembre.

L'allure de la courbe de vitesse moyenne indique nettement la violence du coup de vent qui commença exactement à 8h52m du soir, où la vitesse du vent s'élève brusquement de 4 *m* par seconde, vitesse relativement faible, à 42 *m*, où elle se maintient pendant deux à trois minutes, pour diminuer progressivement de 9h3m à 9h15m du soir, et devenir à nouveau assez faible une demi-heure plus tard. Ce coup de vent, qui soulevait des tourbillons épais de poussière et occasionna quelques dégâts à Paris, avait été précédé de nombreux et violents éclairs qui illuminaient le ciel depuis 7 heures du soir; il fut accompagné d'une chute très intense de pluie et de grêle qui donna 38 *mm* aux pluviomètres du Bureau météorologique.

L'enregistreur de vitesse absolue a accusé un maximum de 44 *m* par seconde, entre 9 heures et 9h1m du soir; c'est la plus grande vitesse absolue qui ait pu être enregistrée jusqu'à présent au sommet de la Tour.

Les parties pointillées des courbes des 12 novembre 1891 et du 6 septembre 1890 ont été obtenues au moyen du compteur totalisateur de l'espace parcouru par le vent, qui donne un contact tous les 5.000 tours du moulinet, c'est-à-dire tous les 5.000 *m* parcourus par le vent; on a divisé ces 5.000 mètres d'espace parcouru par le temps employé à les parcourir mesuré sur le cylindre de l'appareil par la distance entre deux contacts successifs.

§ 7. — Travaux de M. Langley.

Il est intéressant de rapprocher ces résultats de ceux que renferme le mémoire publié par M. S. P. Langley, secrétaire de l'Institut Smithson de Washington (*Revue de l'Aéronautique*, 1893, 3me livraison). Ce mémoire a pour titre : *Le travail intérieur du vent*.

M. Langley s'est servi pour ses expériences d'anémomètres Robinson particulièrement légers (1) dans lesquels l'enregistrement électrique se faisait à chaque demi-révolution sur un chronographe astronomique ordinaire, lequel était placé sur le sol de la Tour de 47 *m* de hauteur où se faisaient les observations. Voici ce que dit M. Langley au sujet des diagrammes qui figurent dans son mémoire.

« Ces diagrammes mettent en lumière cette particularité remarquable que les fluctuations du vent sont d'autant plus accentuées que la vitesse absolue de celui-ci est plus considérable.

« Ainsi, par un vent violent, l'air se meut en une masse tumultueuse où la vitesse peut s'élever à un moment donné jusqu'à 64,4 *km* à l'heure (17,90 *m/s*) pour tomber presque instantanément jusqu'au calme, reprendre ensuite, etc.

« Ce fait, qu'un calme local absolu peut se produire momentanément par un vent fort prédominant, m'a vivement frappé pendant les observations du 4 février. En levant les yeux vers le léger anémomètre dont la rotation était si rapide qu'on ne pouvait distinguer séparément les coupes, je vis tout à coup celles-ci s'arrêter un instant, puis reprendre leur grande vitesse de rotation, le tout en moins d'une seconde ; cette remarque confirma mes soupçons sur l'insuffisance de l'enregistrement chronographique des indications d'un anémomètre

(1) L'anémomètre ordinaire Robinson de l'Institution Smithsonienne avec coupes en aluminium était construit sur les données suivantes :

Diamètres entre les centres des coupes opposées	0,34 *m*
Diamètre des coupes	10,16 *cm*
Poids des bras et des coupes	241 *g*.
Moment d'inertie	40,710 gcm^2

On en fit construire un autre de mêmes dimensions, mais beaucoup plus léger. Le poids était de 48 *g* et le moment d'inertie de 11,940 gcm^2, ce qui est déjà un résultat satisfaisant.

Celui qui finalement a été construit par M. Langley lui-même a un diamètre moitié moindre que le modèle habituel, soit 0,17 *m*. Les hémisphères sont remplacés par des cônes du poids total de 5 *g*. Le moment d'inertie est seulement de 300 gcm^2, ce qui est tout à fait remarquable pour un appareil ayant résisté aux vents de tempête.

même exceptionnellement léger, pour exprimer la rapidité réelle de ces variations intérieures. Puisque la vitesse est comptée d'après l'intervalle mesuré entre deux contacts électriques, un arrêt instantané, comme celui que j'ai observé fortuitement, sera représenté sur l'enregistreur comme un simple ralentissement du vent, et des faits aussi significatifs que ceux que je viens de citer passeront nécessairement inaperçus, même avec l'appareil le plus sensible de ce genre.

« On conçoit cependant que plus les contacts seront fréquents, plus l'enregistrement s'approchera de la réalité ; aussi ai-je eu soin d'établir un contact par chaque demi-révolution du moulinet, ce qui donne lieu en général à plusieurs enregistrements par seconde.

« J'appelle maintenant l'attention sur des enregistrements effectifs de variations rapides et, pour en donner

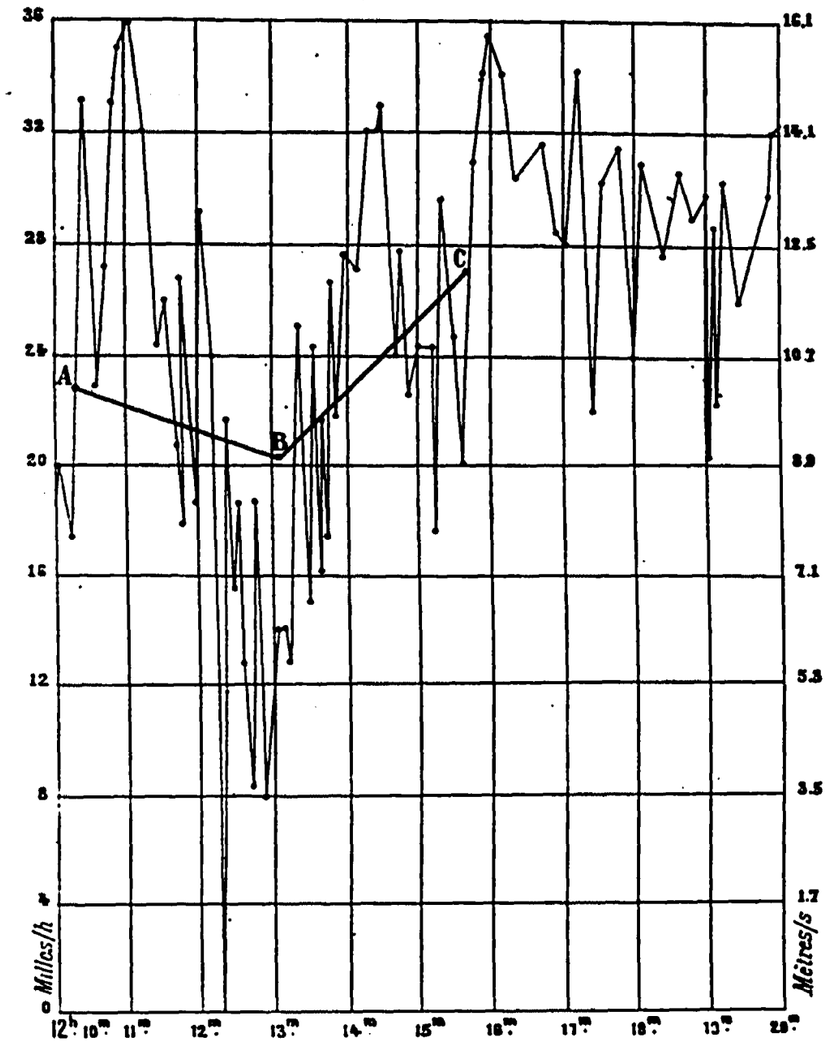


Fig. 217.

une idée précise, je prendrai comme exemple les premières cinq minutes et demie du diagramme représenté figure 217.

« Le trait fort passant par les points ABC est le tracé obtenu avec un anémomètre ordinaire du Bureau météorologique pour le passage de deux milles de vent (3.220 *m*). La vitesse qui, au début de la période considérée, était d'environ 37 *km* à l'heure (10,28 *m* par seconde), tombe, pendant le premier mille, à un peu plus de 32,2 *km* à l'heure (8,95 *m/s*). C'est là l'enregistrement anémométrique ordinaire à cette hauteur (47 *m*) au-dessus du sol, où le vent est soustrait aux perturbations résultant du voisinage immédiat des inégalités terrestres et où l'on admet communément que sa direction seule est soumise à des variations occasionnelles, ainsi que le montre en effet la girouette, tandis que son mouvement serait assez régulier pour qu'on puisse le considérer, pour un court intervalle de deux à trois minutes, et dans les circonstances ordinaires, comme approximativement uniforme. C'est donc là ce qu'on appelle « le vent », c'est-à-dire le vent conventionnel des traités d'aérodynamique, où on ne le considère que sous l'aspect d'un courant pratiquement continu.

« Mais il en est tout autrement si l'on examine le tracé enregistré dans le même temps de seconde en seconde, avec un anémomètre exceptionnellement léger. La vitesse initiale de 37 *km* à l'heure (10,28 *m/s*) à midi 10'18" s'élève en 10 secondes à 53 *km* (14,70 *m/s*), revient, dans les 10 secondes suivantes, à sa valeur

primitive, remonte ensuite en 30 secondes jusqu'à 58 *km/h* (16,10 *m/s*) et ainsi de suite avec des alternatives analogues comprenant même, à un certain moment, un calme absolu.

« On voit aussi que la vitesse a passé par 18 maxima notables et par autant de minima, l'intervalle moyen entre un maximum et un minimum étant d'un peu plus de 10 secondes et la moyenne des changements de vitesse pendant ce temps d'environ 16 *km* par heure (4,45 *m/s*). »

Il est à désirer que des expériences de ce genre puissent être continuées à l'aide d'anémomètres d'une extrême légèreté et de l'appareil à indications rapides du Bureau.

On pourra alors se représenter ce phénomène, si peu connu et d'un si grand intérêt, qu'est le vent, et dont nous ne mesurons avec quelque certitude ni la vitesse ni la pression. Les moyennes de vitesse que nous donnent plus ou moins approximativement les instruments usuels n'ont, tout au moins au point de vue de l'ingénieur et de la stabilité des constructions, qu'un très faible intérêt.

Les *pulsations* du vent, avec leurs intensités réelles à chaque instant, ont au contraire une importance capitale qui reste à déterminer.

CHAPITRE III

PHÉNOMÈNES PHYSIQUES

I. — Électricité atmosphérique.

§ 1. — Conductibilité électrique de la Tour et de ses prises de terre.

Nous rappellerons d'abord qu'au moment de la construction une Commission spéciale composée de M. Becquerel, membre de l'Institut, de M. Mascart, membre de l'Institut et directeur du Bureau central météorologique, et de M. Georges Berger, président honoraire de la Société Internationale des électriciens, avait indiqué les mesures spéciales à prendre pour protéger la Tour contre l'action de la foudre.

Nous extrayons du rapport de cette Commission les passages suivants :

« La Tour de 300 *m* pourra jouer le rôle d'un immense paratonnerre protégeant un très large espace autour d'elle, à condition que sa masse métallique soit en communication parfaite avec la couche aquifère du sous-sol par le moyen de bons conducteurs.

« Grâce à ces précautions, l'intérieur de l'édifice, avec les personnes qui s'y trouveront abritées, sera absolument assuré contre tout accident pouvant provenir des coups de foudre fréquents qui frapperont infailliblement les parois de la Tour à différentes hauteurs.

« Pour réaliser la non-isolation de la Tour dans les meilleures conditions, on noiera dans la couche aquifère des conducteurs métalliques à grande section, émergeant du sol et mis en communication avec les parties métalliques basses de la Tour, au moyen de câbles, de barres ou de lames de cuivre à grandes sections. »

Nous avons indiqué précédemment comment il avait été obéi à ces prescriptions pour les prises de terre. Nous ajouterons seulement, au point de vue des paratonnerres, que celui qui surmonte le campanile est du système Melsens; il est terminé par trois pointes inclinées de 1,50 *m* de longueur et il a une longueur totale de 10,79 *m*. On a en outre disposé sur le balcon supérieur de la 3ᵉ plate-forme, à raison de deux par face, huit paratonnerres inclinés de même type.

Il était essentiel de s'assurer que les prises de terre répondaient bien au but que l'on s'était proposé.

Une première détermination de cette résistance a été faite en janvier 1889 par M. G. Borrel. La méthode employée a été celle du pont de Wheatstone, modifiée par M. E. Guérin, capitaine à la section technique de l'artillerie. La plus grande résistance trouvée est de 4 ohms 125 (terres de la pile 3) et la moindre 1 ohm 05 (terres de la pile 4). La valeur maximum que doit présenter la résistance d'une bonne terre de paratonnerre étant admise à 15 ohms, on reconnaît que la terre la plus résistante est 3 1/2 fois moindre que la limite indiquée, c'est-à-dire que ces prises de terre sont dans les meilleures conditions.

En août 1889, M. A. Terquem, chef d'escadron d'artillerie, a fait de nouvelles expériences très précises sur la conductibilité électrique de la Tour et de ses prises de terre; elles sont relatées dans une note présentée à l'Académie des Sciences le 2 décembre 1889, que nous reproduisons en entier, en raison de son intérêt, et qui résume tout ce qui peut être dit à ce sujet :

La Tour Eiffel étant la première construction en fer d'aussi grande dimension dans le sens vertical, et devant, en raison de sa forme, subir de la part de l'électricité atmosphérique une action considérable, il a paru intéressant de vérifier, par des mesures précises, les conditions de sa conductibilité propre et de ses liaisons avec la terre. La Tour est munie actuellement de neuf paratonnerres, surmontés d'une aigrette de pointes et reliés directement à la charpente en fer qui fait l'office de conducteur; on a pensé que cette charpente, assemblée au moyen d'innombrables rivets placés à chaud et en réunissant les diverses parties avec une pression très considérable, formerait une masse aussi conductrice que si l'on avait eu recours aux soudures habituelles.

Les prises de terre, destinées à assurer la liaison avec le sol, sont au nombre de huit, par groupe de deux pour chaque pile; pour les piles Nord et Ouest, ce sont des tubes en fonte, de 20 *cm* de diamètre, descendant verticalement, à 12 *m* environ au-dessous de la surface du sol à la cote de 20 *m*; pour les piles Est et Sud, ce sont de gros tubes de 50 *cm* de diamètre, descendant verticalement d'abord, puis se recourbant à angle droit sur une longueur moyenne de 18 *m*; ils sont enfouis dans les alluvions de la Seine, à la cote 26 *m*. Provisoirement, les perd-fluides sont réunis à la Tour par des câbles en fer et des bandelettes en fer feuillard, appliquées sur les charpentes.

On s'est servi pour la mesure des conductibilités, une première fois d'un pont de Wheatstone, construit par M. Gaiffe pour la vérification des paratonnerres des magasins à poudre; la seconde fois, on a opéré simultanément avec un autre appareil du même constructeur, muni d'un galvanomètre à réflexion du type Deprez et d'Arsonval, qui permet un emploi commode de la méthode de Mance.

La détermination de la résistance d'une prise de terre exige trois expériences et deux prises de terre auxiliaires, dont on mesure la somme des résistances deux à deux. Les trois inconnues sont données par trois équations du premier degré.

Dans l'espèce, il a suffi de combiner deux à deux les prises de terre de la Tour elle-même.

Pour mesurer la conductibilité de la Tour, le câble de transmission du phare et des projecteurs a été isolé d'abord des appareils et mis en communication avec la base du paratonnerre central; on a ensuite relié la base du câble et une charpente de la pile Ouest aux deux bornes du pont, la Tour fermant le circuit. La résistance, mesurée plusieurs fois, a été trouvée égale au degré d'approximation des appareils, à la résistance des câbles qui avaient servi aux connexions. La résistance de la Tour est donc négligeable.

Pour mesurer la résistance des perd-fluides, on les a isolés de la Tour dans les piliers Est, Sud et Ouest, et l'on a obtenu, pour trois d'entre eux:

E_1..... 0,3 ω S_1..... 0,3 ω S_2..... 3,2 ω

Dans la deuxième série d'expériences, on a isolé les perd-fluides N_1 et N_2 de la pile Nord, en prenant comme troisième terre la Tour T à la base de la pile Est. La méthode du pont avec le premier appareil Gaiffe et la méthode de Mance avec le second appareil ont donné :

	ω		ω
T.....	0,1	T.....	0,15
N_1.....	0,9	N_1.....	1,05
N_2.....	1,1	N_2.....	1,35

Pour la méthode de Mance, la pile employée était composée de deux éléments au sulfate acide de bioxyde de mercure, pile très constante et n'ayant que 1,9 ω de résistance.

On a enfin isolé le perd-fluide E_1 de la pile Est en le comparant aux deux perd-fluides de la pile Nord; les expériences ont donné :

E..... 0,2 ω N_1..... 1,1 ω N_2..... 1,3 ω

Il semble qu'il peut être conclu de ces expériences, faites à deux mois d'intervalle, dans des conditions variées comme méthode et comme appareils, que la concordance des résultats obtenus offre de sérieuses garanties d'exactitude.

La Tour elle-même doit être considérée comme un assemblage de charpentes parfaitement en contact les unes avec les autres, formant un conducteur de résistance inappréciable; sa liaison avec le sol, au moyen de huit perd-fluides et des canalisations, est excellente, puisque la résistance n'a été trouvée que de 0,1 ω ou 0,15 ω au plus pour une seule pile.

Les perd-fluides des piliers Est et Sud, qui offrent une très grande surface enfouie dans les alluvions de la Seine, n'ont que très peu de résistance, 0,3 ω; quant aux perd-fluides des piliers Nord et Ouest, si leur résistance est plus forte, 1,1 ω et 3,2 ω, c'est sans doute parce que leur surface est beaucoup moindre et qu'ils traversent les caissons en béton formant les assises de la Tour.

En résumé, nous pensons que l'ensemble des paratonnerres de la Tour Eiffel, établi suivant les savantes indications de MM. Becquerel, Berger et Mascart, peut être considéré comme très parfait, et qu'il est de nature à exercer sa protection dans un rayon considérable.

§ 2. — Coups de foudre.

La foudre a frappé un grand nombre de fois le paratonnerre supérieur ; et nous avons même une photographie représentant d'une manière très nette ce phénomène.

Nous rappellerons seulement une observation faite le 19 août 1889, par M. Foussat, chef du service électrique de la Tour.

« Vers 9 heures et demie du soir, un vent très violent soufflait du nord-ouest accompagné d'une pluie fine. Rien ne faisait soupçonner la présence d'un orage, quand tout à coup un éclair immense a sillonné les nues et frappé avec un bruit épouvantable le paratonnerre, qui se trouve au sommet de la Tour, au-dessus du phare ; la Tour métallique a résonné sous ce coup comme un diapason, et la vibration a duré plusieurs secondes. Au moment de la décharge, quelques gouttelettes de fer en fusion sont tombées, provenant probablement de la fusion de la tige du paratonnerre, qui momentanément était dépourvue de sa pointe. Le bruit de cette décharge disruptive a imité celle de deux petites pièces d'artillerie tirées à intervalle inappréciable, mais cependant distinct à l'oreille. Le gardien du phare n'a ressenti aucune commotion, pas plus que les trois personnes qui se trouvaient sur la plate-forme des projecteurs. Depuis quelques jours, il avait été installé huit paratonnerres autour de la plate-forme des projecteurs ; l'extrémité de ces paratonnerres est constituée par un faisceau de tiges minces en cuivre surmonté d'une tige qui s'avance de quelques centimètres en avant du faisceau. Ces paratonnerres ont parfaitement rempli leur rôle ; les nuages, en passant, se déchargeaient, produisant des décharges dites silencieuses, mais qui, en réalité, sont crépitantes et rappellent l'effet produit par un court circuit rapide, effet bien connu des électriciens. »

§ 3. — Variation diurne de l'électricité atmosphérique.

M. A.-B. Chauveau a fait sur cette variation d'importants travaux, qui sont reproduits dans un mémoire présenté au Congrès météorologique de Chicago (août 1893) et dans deux communications à l'Académie des Sciences (26 décembre 1893 et 25 septembre 1899); nous reproduisons celle-ci :

Une série d'observations sur l'électricité atmosphérique au sommet de la Tour Eiffel a été organisée par le Bureau central météorologique, avec le concours du Conseil municipal de Paris.

La prise de potentiel est faite, suivant la méthode indiquée par Lord Kelvin, à l'aide d'un mince filet d'eau jaillissant de l'extrémité d'un tube horizontal, à 1,60 *m* en dehors de la Tour. Le bassin métallique, constituant le réservoir d'eau, repose sur trois tubes de verre scellés dans une couche de soufre et noyés dans une masse épaisse de paraffine (1). Le tout est enfermé dans une boîte en chêne et placé, à l'altitude de 285 *m*, sur l'extrémité de l'un des quatre arceaux (arceau Ouest) qui soutiennent la lanterne du phare.

L'enregistreur photographique est un cylindre de Richard, monté horizontalement et tournant à l'intérieur d'une enveloppe métallique, dans laquelle une fente étroite est percée suivant une génératrice. Le papier photographique est enroulé sur le cylindre, la face sensible appliquée sur le métal, de telle sorte que ce soit le dos de la feuille qui se présente à l'impression lumineuse.

Dans les conditions que nous venons d'indiquer, c'est-à-dire à 1,60 *m* envi-

(1) L'isolement ainsi obtenu est au moins l'équivalent de celui que donnent les meilleurs supports à acide sulfurique, mais sous cette condition absolue que la surface de la paraffine reste nette de toute poussière. Très aisément réalisable à l'altitude de 300 *m*, où l'air ne renferme plus que fort peu de matières solides en suspension, cette condition est un obstacle sérieux à l'emploi de la paraffine pour des observations continues au voisinage du sol.

ron de la surface de la Tour, le potentiel est fréquemment supérieur à 10000 volts. Or, l'électromètre à quadrants, au moins sous sa forme ordinaire, ne paraît pas se prêter à la mesure des potentiels élevés. La déviation de l'aiguille a une valeur limite, variable avec la sensibilité de l'appareil, mais correspondant toujours à une même valeur du potentiel qui est d'environ 3.000 volts.

Pendant une première série d'expériences faites à la fin de 1892, on avait dû, pour rester dans la limite des potentiels mesurables, réduire à 40 *cm* la longueur du tube d'écoulement. Mais, à cette altitude, les surfaces de niveau sont extrêmement serrées au voisinage de la Tour; aux plus légères variations dans la longueur du jet (provenant de l'action du vent par exemple) correspondent des variations considérables du potentiel observé et les courbes obtenues sont trop tourmentées pour pouvoir être dépouillées avec certitude.

A défaut d'un instrument qui ne paraît pas avoir été réalisé jusqu'ici sous une forme appropriée aux observations d'électricité atmosphérique, nous avons pu, par un artifice fort simple, utiliser l'électromètre à quadrants pour la mesure de très hauts potentiels, tout en restant dans les limites ordinaires de la sensibilité de cet appareil. Il suffit, pour cela, de placer, entre la source et l'électromètre, une cascade de petits condensateurs bien isolés. En faisant varier le nombre des éléments de la cascade, on peut donner à l'aiguille telle fraction que l'on veut du potentiel primitif.

Les observations faites par ce procédé en 1893 ont été poursuivies sans interruption depuis le 1er mai jusqu'au 2 novembre, et forment deux séries. La première, qui s'étend du 1er mai au 20 août, nous a fourni cinquante-huit journées utilisables, caractéristiques du régime d'été. Nous en donnons ici le résumé, sous forme de graphique, et nous y joignons la variation diurne observée pendant la même période au Bureau central météorologique.

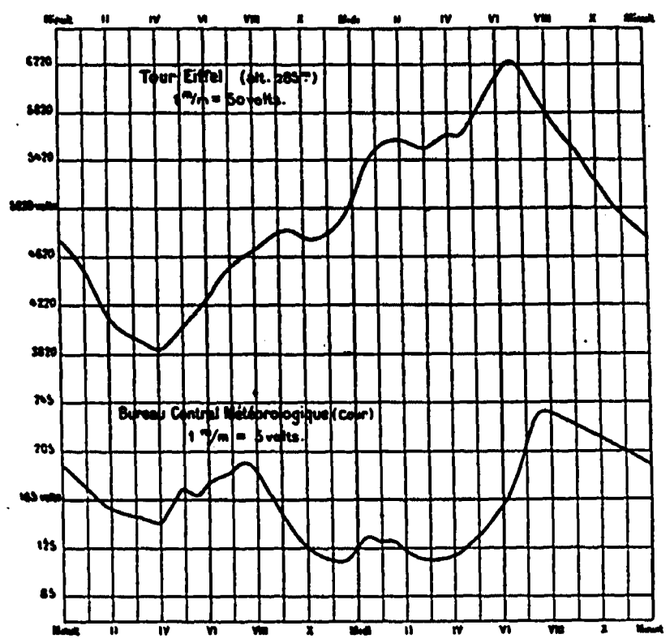


Fig. 218. — Variation diurne de l'électricité atmosphérique du 1er mai au 20 août 1893.

De la comparaison de ces courbes, il résulte d'abord que, pour l'électricité atmosphérique comme pour la tension de la vapeur d'eau, la variation diurne se simplifie quand on s'éloigne du sol. Tandis qu'aux faibles altitudes on observe invariablement une oscillation double dans la valeur du potentiel, celle-ci ne présente plus qu'un maximum et un minimum au voisinage du sommet de la Tour Eiffel.

Le minimum du matin se produit exactement à la même heure (4 heures) à la Tour et au Bureau; il précède de fort peu l'heure du lever moyen du soleil pendant la période considérée.

Le maximum du soir, à la Tour, a lieu à 6h30m; il est en avance de 1h15m sur le maximum observé au voisinage du sol.

Enfin, les deux courbes mettent nettement en évidence l'existence d'un maximum relatif au milieu du jour, vers 1 heure ou 2 heures de l'après-midi. Cette oscillation secondaire, signalée autrefois par M. Mascart dans les observations du Collège de France, constatée à Greenwich et à Perpignan, n'a pas été retrouvée à Lyon. Elle paraît hors de doute, quelle que soit l'altitude pour le climat de Paris.

Ces observations, poursuivies pendant huit ans, forment aujourd'hui une série assez étendue pour que les données qui s'en déduisent présentent un caractère suffisant d'exactitude. J'indique ici les résultats de ces recherches, relatifs à la variation diurne du potentiel en un point déterminé de l'atmosphère.

I. Il existe, dans nos régions tempérées, deux types très différents de la variation diurne *au voisinage du sol*; l'un correspond à la saison chaude, l'autre à la saison froide.

Pendant l'été, un minimum très accusé se produit aux heures chaudes du jour et constitue le minimum principal toutes les fois que le point exploré n'est pas suffisamment dégagé de l'influence du sol, des arbres ou des bâtiments voisins. L'oscillation diurne est double; c'est la loi généralement admise pour cette variation.

Pendant l'hiver, le minimum de l'après-midi s'atténue ou disparaît, tandis que le minimum de nuit s'accentue davantage. Considérée dans son ensemble, l'oscillation paraît simple, avec un maximum de jour et un minimum vers 4 heures du matin. Ce caractère est d'autant plus net que le lieu d'observation est plus dégagé.

II. Cette distinction des deux régimes d'hiver et d'été au voisinage du sol est confirmée par l'examen des résultats obtenus, d'une part à Sodankyla (Finlande) par la mission dirigée par M. Lemstrom (1883-1884), de l'autre à l'observatoire de Batavia (1887-1895). Chacune de ces stations donne, pour ainsi dire, le type exagéré de la variation constatée dans nos climats, soit pendant la saison froide, soit pendant la saison chaude.

III. *La variation diurne au sommet de la Tour Eiffel*, PENDANT L'ÉTÉ, *entièrement différente de la variation correspondante au Bureau central, offre la plus frappante analogie avec la variation d'hiver.*

Ce même type d'hiver se retrouve, moins accentué, mais parfaitement net, dans la moyenne fournie par trois mois d'observations, *pendant l'été* de 1898, sur le pilône de l'observatoire de Trappes (altitude 20 *m*). Il apparaît donc comme caractérisant la forme constante de la variation diurne en dehors de toute influence du sol.

IV. Au contraire, dans les stations où le collecteur est dominé par des constructions ou des arbres voisins, le type correspondant au régime d'été s'exagère; le minimum de l'après-midi se creuse au détriment du minimum de nuit, qui parfois disparaît. L'oscillation peut être simple, mais en sens inverse de l'oscillation d'hiver, c'est-à-dire avec un minimum de jour et un maximum de nuit. Cette forme anormale de la variation diurne, constatée autrefois par M. Mascart, résulte en effet des observations du Collège de France, mais pour la saison d'été seulement. On la retrouve encore, presque identique, à Greenwich, où le collecteur est placé dans des conditions aussi défavorables.

On peut conclure de ce qui précède :

1° Qu'une influence du sol, maximum pendant l'été, et dont le facteur principal, suivant les idées de Peltier, est peut-être la vapeur d'eau, intervient comme cause perturbatrice dans l'allure de la variation diurne.

2° Que la loi véritable de cette variation, celle dont toute théorie, pour être acceptable, doit rendre compte, se traduit par une oscillation simple, avec un maximum de jour et un minimum (d'ailleurs remarquablement constant) entre 4 heures et 5 heures du matin.

II. — Résistance de l'air et pression du vent.

§ 1. — Recherches expérimentales sur la chute des corps et sur la résistance de l'air à leur mouvement.

MM. Louis Cailletet, membre de l'Institut, et E. Colardeau ont fait en 1892 les plus intéressantes recherches sur ce sujet dans un laboratoire (Voir figure 219) que j'avais fait installer à la deuxième plate-forme de la Tour à 120 *m* d'altitude au-dessus du sol. Ces recherches ont été publiées dans les *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* (1892), dans *la Nature* (9 juillet 1892) et dans les *Comptes rendus de la Société de physique* (4 novembre 1892).

MM. L. Cailletet et E. Colardeau résument ainsi leur travail :

Un très petit nombre d'expériences ont été faites jusqu'ici sur la chute des corps en tenant compte de la résistance que l'air oppose à leur mouvement. Cependant, en dehors de l'intérêt scientifique qu'elle présente, l'étude de cette question permettrait de résoudre un grand nombre de difficultés qui se rencontrent à chaque instant dans diverses applications pratiques, résistance de l'air aux trains de chemins de fer et aux navires en marche, direction des ballons, questions relatives à l'aviation, influence du vent sur les constructions, emploi du vent comme moteur, etc.

Jusqu'ici, les expériences faites sur ce sujet ont été exécutées surtout en imprimant aux corps un mouvement de rotation obtenu à l'aide d'une sorte de manège.

D'après les auteurs eux-mêmes, les méthodes employées ne donnent que des résultats incomplets à cause de l'entraînement de l'air, de la force centrifuge, etc.; de plus, la vitesse qu'on peut atteindre ainsi est fort limitée.

Nous avons pensé que la Tour Eiffel offrait des conditions particulièrement avantageuses pour étudier plus complètement cette intéressante question et pour aborder directement l'étude du mouvement rectiligne.

Principe de la méthode. — Quand un corps se déplace dans l'air, il éprouve de la part de celui-ci une résistance qui s'accroît en même temps que la vitesse du mouvement. Supposons que ce corps soit sollicité par une force constante, comme il l'est, par exemple, par son propre poids, quand on l'abandonne en chute libre. Si, au lieu d'être plongé dans l'air, il était dans le vide, sa vitesse, nulle au départ, irait constamment en croissant et son mouvement s'accélérerait indéfiniment. S'il est plongé dans l'air, il n'en sera pas de même. A mesure que la vitesse du mobile croîtra, il éprouvera une résistance elle-même croissante, de sorte que son mouvement cessera de s'accélérer et deviendra uniforme précisément quand la résistance de l'air équilibrera exactement l'effet de la pesanteur sur le corps.

Si l'on mesure, d'une part, la vitesse V du corps au moment où son mouvement devient uniforme, et d'autre part son poids P, on sauraque l'effort exercé par l'air sur le corps animé de la vitesse V est précisément P.

En augmentant le poids du corps, sans modifier sa surface, par l'addition d'un lest convenable, on augmentera en même temps la vitesse V du mouvement uniforme limite, de sorte que la comparaison des diverses valeurs de P avec les valeurs correspondantes de V permettra de découvrir la loi de variation de la résistance en fonction de la vitesse.

Pour mettre cette méthode en pratique, l'appareil employé repose sur le principe suivant :

Imaginons un fil fin de grande longueur subdivisé en sections égales, de 20 *m* par exemple. Attachons légèrement à des points de suspension les subdivisions des sections consécutives, en laissant pendre entre ces points les différents tronçons successifs de 20 *m*. Supposons qu'aux points de suspension se trouvent des contacts électriques susceptibles de fonctionner sous l'influence d'une très légère traction du fil et réunis à un stylet enregistreur adapté à un cylindre tournant suivant la disposition bien connue. Laissons tomber le corps pesant situé à l'extrémité libre du fil.

L'instant du départ sera enregistré sur le cylindre par le premier contact. Dès que le corps, en tombant, aura parcouru 20 *m*, il aura entraîné avec lui le premier tronçon de fil qui se sera développé verticalement en suivant le corps ; le deuxième contact fonctionnera à son tour, et ainsi de suite. Si l'on annexe au cylindre un diapason enregistreur faisant, par exemple, 100 vibrations par seconde, le graphique tracé sur le cylindre indiquera, en centièmes de seconde, au bout de quels intervalles de temps le corps a parcouru 20, 40, 60 *m*. Aussitôt que le mouvement sera devenu uniforme, on s'en apercevra sur le graphique par ce fait que les contacts successifs fonctionneront à des intervalles de temps équidistants. Ces intervalles étant mesurés, en centièmes de seconde, par les sinuosités de la courbe du diapason, on aura immédiatement la vitesse uniforme du mobile.

Disposition pratique de l'appareil. — En pratique, il serait impossible de laisser flottants dans l'espace les tronçons successifs du fil, qui par l'effet des courants d'air s'enchevêtreraient les uns dans les autres. On a évité cet inconvénient par l'artifice suivant.

Chaque section du fil est enroulée sur un cône de bois C_1 C_2 C_3 (Voir fig. 220) fixé verticalement, la pointe tournée en bas. On conçoit que le fil entraîné par la chute du mobile le suit avec la plus grande facilité ; à cause de leur forme conique, ces bobines, bien qu'immobiles, permettant à ce fil de se dérouler, pour ainsi dire, sans frottement. On a du reste évalué par une mesure directe, comme on le verra plus loin, le retard qui peut provenir d'une résistance au déroulement du fil.

Les contacts électriques destinés à enregistrer chaque parcours de 20 *m* sont formés de deux lames métalliques LL′ isolées en I par un morceau d'ébonite et dont les extrémités se touchent par l'intermédiaire de contacts en platine. Cette sorte de pince est traversée par un courant électrique qui va animer la plume de l'enregistreur et qui est interrompu lorsque les deux branches s'écartent. En passant d'un cône C_1 au suivant C_2, le fil est engagé dans l'intervalle libre que laissent entre elles les deux branches de chaque pince, immédiatement au-dessus du contact en platine. Quand le cône C_1 est déroulé, le fil fixé au mobile écarte un instant les branches de la pince et ouvre le courant qui se rétablit aussitôt. C'est alors que la plume de l'enregistreur laisse une trace sur le cylindre tournant. Puis le cône C_2 se déroule à son tour ; la seconde pince s'ouvre après un nouveau parcours de 20 *m*, et ainsi de suite.

Les lames LL′ qui constituent chaque pince étant très souples, la résistance qu'elles opposent à l'écartement par le passage du fil est extrêmement faible. Dans des essais faits pour évaluer cette résistance, un poids de 2 *g* tombant de la hauteur de 10 *cm* a suffi pour écarter ces lames. Un calcul très simple permet de s'assurer que cet effort retarderait de moins de 1 *mm* la chute d'un poids de 1 *kg* après un parcours de 20 *m*.

Pour évaluer la double résistance pouvant provenir du déroulement du fil, de son frottement dans l'air et des autres résistances passives, plusieurs méthodes ont été employées :

1° On a laissé tomber une flèche cylindrique de bois lestée à sa partie inférieure par une masse métallique terminée en pointe effilée. A cause de sa faible section et de sa forme allongée, cette flèche ne doit éprouver par elle-même qu'une minime résistance de la part de l'air. Elle doit prendre, par suite, un mouvement de chute peu différent de celui qu'elle aurait dans le vide. Cette dernière conclusion s'applique encore, si les résistances possibles dues au fil entraîné sont négligeables. Or, dans plusieurs expériences très concordantes, on a trouvé que la durée totale de la chute de cette flèche ne diffère pas de celle de la chute théorique dans le vide de plus de $\frac{20}{1.000}$ de sa valeur.

2° Un second moyen de vérification a consisté à laisser tomber le mobile entièrement libre et non attaché au fil. L'instant de son départ est enregistré par la plume électrique dont le circuit est interrompu par la chute même du corps au moment où il se met en mouvement. En arrivant au sol, ce mobile vient frapper un panneau en bois soutenu par des ressorts et que traverse un courant qui anime la plume de l'enregistreur. Au moment du choc, le panneau cède et le courant est interrompu, de sorte que l'instant précis de l'arrivée est enregistré aussi bien que celui du départ. En comparant la durée totale de chute libre ainsi obtenue à celle que donne le même mobile attaché au fil et faisant fonctionner les pinces, la différence de ces durées représente la somme des retards que subit ce mobile de la part des résistances passives dues à l'appareil.

Dans deux expériences consécutives faites avec un cylindre de cuivre du poids

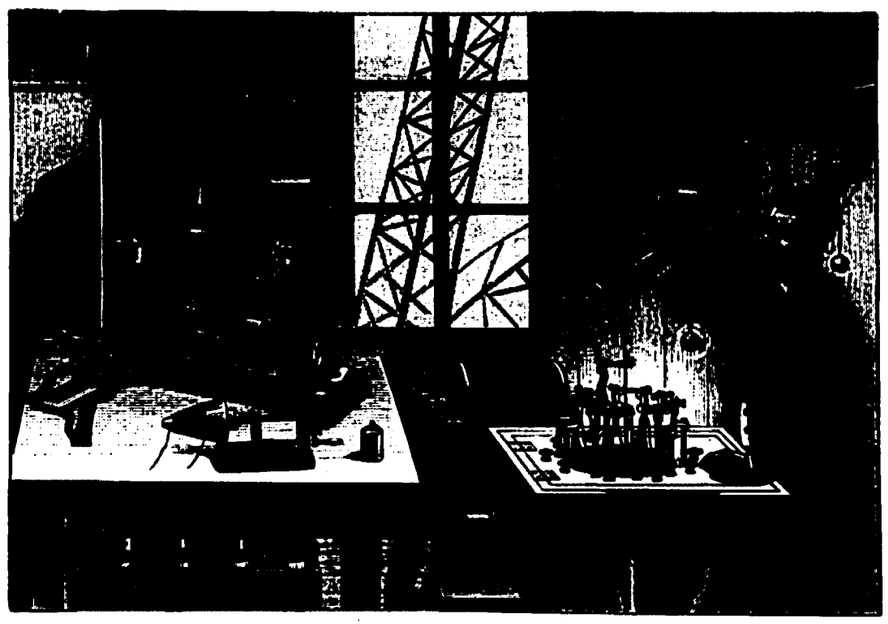
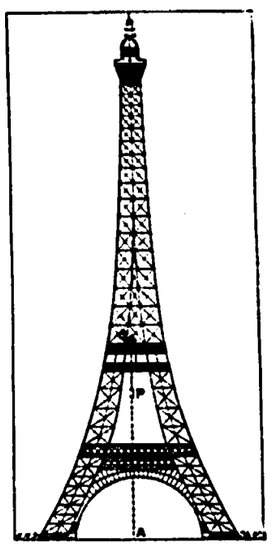


Fig. 219. — Laboratoire de la deuxième plate-forme.



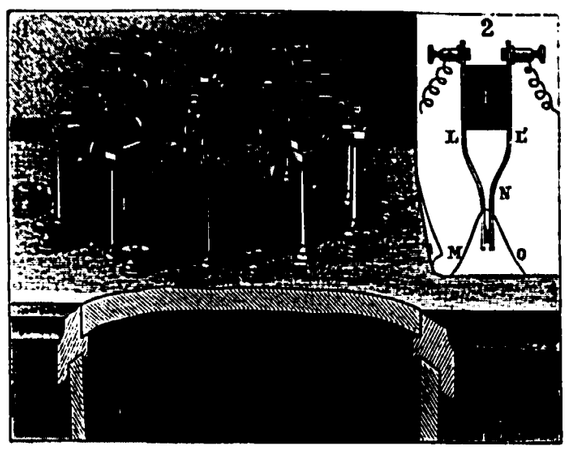


Fig. 220.

de 2.080 *g*, on a trouvé que la différence des durées de chute de ce cylindre, lorsqu'il est attaché au fil et lorsqu'il est entièrement libre, est de 0″,04 sur une durée totale de chute de 5″. Le retard dû à l'entraînement du fil est donc inférieur à 1 p. 100.

L'appareil a permis de vérifier que la résistance opposée par l'air à des plans d'égale surface, se mouvant dans une direction normale à ces plans, est indépendante de leur forme. Pour des surfaces circulaires, carrées, triangulaires, on a trouvé des durées de chute égales, comme on peut le vérifier sur la figure 221, tracés 3 et 4. Cette figure est la réduction au quart des graphiques réels. La courbe du diapason est tracée en supposant qu'il exécute 25 vibrations par seconde.

On a vérifié également que la résistance éprouvée par un plan en marche dans l'air est proportionnelle à sa surface. Deux plans carrés dont les surfaces étaient entre elles comme 1 et 2 ont été lestés par des poids qui étaient dans le même rapport. Les durées de chute ont été respectivement 6″,92 et 6″,96, nombres à peu près identiques et d'après lesquels il y a lieu d'admettre la proportionnalité.

Les plus nombreuses expériences ont porté sur l'évaluation en kilogrammes, par mètre carré, de la résistance opposée par l'air à une surface plane en mouvement et sur la recherche de la loi de variation de cette résistance en fonction de la vitesse. On a vu plus haut comment on peut obtenir cette loi par l'évaluation du poids du mobile et par la mesure de sa vitesse quand son mouvement de chute est devenu uniforme. Dans toutes les expériences dont il s'agit, le lest des surfaces employées a été réglé de manière à obtenir l'uniformité du mouvement après un parcours compris entre 60 et 100 *m*.

On sait qu'on admet généralement que la résistance de l'air est proportionnelle à la surface et au carré de la vitesse du corps en mouvement, du moins pour des vitesses modérées comme celles dont il est question ici. La formule exprimant cette loi est :

$$P = RSV^2$$

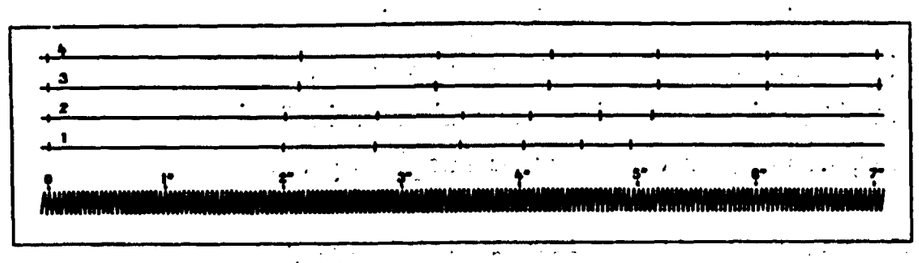


Fig. 221.

P étant la pression de l'air sur le corps, S sa surface, et V sa vitesse. Les ingénieurs adoptent généralement pour la constante R la valeur 0,12248, P étant exprimé en kilogrammes par mètre carré, S en mètres carrés et V en mètres par seconde.

Si cette formule est exacte, la valeur de R calculée d'après elle, à l'aide d'une série de valeurs correspondantes de P et de V, pour des plans de même surface S, doit toujours être la même pour des vitesses différentes. Les expériences faites à la Tour Eiffel ont donné pour les valeurs de R ainsi calculées des nombres assez voisins les uns des autres pour qu'il y ait lieu d'admettre l'exactitude de la formule au point de vue pratique pour des vitesses allant jusqu'à 25 *m* par seconde.

Mais la valeur numérique de R ainsi obtenue est très différente de celle adoptée jusqu'ici. Les diverses valeurs trouvées pour R oscillent entre 0,069 et 0,071. La valeur moyenne à admettre est donc 0,070.

La détermination de ce coefficient, dont la valeur 0,07 est très différente du nombre 0,125 admis par les formules courantes (1) et qui réduit la pression du vent à 57 p. 100 de celle qu'on adoptait généralement, a fait aussi l'objet des recherches de M. Langley (Experiments in aerodynamics) et que relatent les *Comptes rendus de la Société de physique* (mars 1892).

Ces expériences ont été faites à l'aide d'un manège de 9 *m* de rayon au bout duquel avait été fixé un fléau mobile dans tous les sens autour de son centre, au moyen d'une suspension de Cardan et permettant de mesurer en grandeur et en direction la pression agissant sur un plan. Ce plan lui-même pouvait, dans le sens de sa longueur, être placé dans une direction parallèle ou oblique à la direction du mouvement. Pour un plan carré de 305 *mm* de côté et des vitesses variant entre 5 *m* et 11 *m*, on a vérifié la formule générale précédente.

Cette formule est pour les plans normaux très peu différente de celle trouvée par MM. Cailletet et Colardeau, laquelle donne des résultats un peu plus forts.

§ 2. — Blocs de renversement.

D'après l'opinion de nombreux météorologistes, il n'existe pas encore de bons appareils pour la mesure directe de la pression, parce qu'ils sont très difficiles à orienter dès qu'ils ont un peu de masse, et qu'ils n'obéissent pas assez vite aux variations; les frottements sont importants et ne restent pas constants. En

(1) La formule admise, pour la surface normale au vent, est celle de l'hydrodynamique

$$P = p\frac{V^2}{2g} S \delta$$

dans laquelle P est la pression totale en *kg* sur la surface S en mètres carrés, V la vitesse en mètres et δ le poids du mètre cube d'air (qui pour 13° et la pression normale est de 1.234 *kg*), *p* est un coefficient d'expérience variant de 1,86 à 3 suivant la grandeur de la surface ; $g = 9{,}81$.

Elle devient : $P = p \times 0{,}628\, S V^2$.

En prenant $p = 2$ correspondant à une surface moyenne, on en tire $P = 0.125\, S V^2$.

Avec la valeur 0,07 au lieu de 0,125, il semblerait que la valeur de *p* doive être seulement $\frac{0{,}07}{0{,}0628} = 1{,}11$, laquelle est la valeur adoptée en hydraulique.

Poncelet donne pour la pression normale la formule $P = K\left(\frac{V}{4}\right)^2$. La valeur de K est voisine de 2, de sorte qu'elle se réduit à $P = 0{,}125\ V^2$.

Pour les surfaces inclinées, le rapport de la pression normale sur cette surface, à la pression sur cette même surface perpendiculaire à la direction du vent, a pour valeur $\frac{2 \sin \alpha}{1 + \sin^2 \alpha}$ [Ce rapport indiqué par le colonel Duchemin (*Mémorial de l'Artillerie*, 1842, n° 5) a été vérifié par les travaux de M. Langley]. La formule est donc $P = K\, S\, V^2 \frac{2 \sin \alpha}{1 + \sin^2 \alpha}$ dans laquelle $K = 0{,}08$.

second lieu, on arrive à des résultats très différents suivant les dimensions de la plaque essayée et son épaisseur, en raison des remous importants qui se forment en arrière de celle-ci. Aussi préfère-t-on généralement mesurer la vitesse et en déduire la pression par mètre carré, par la formule connue $P=0,125\,V^2$.

Mais d'autre part les ingénieurs qui ont étudié la stabilité des constructions sous l'effet du vent ont souvent reconnu que si les chiffres donnés pour la pression du vent avaient été atteints, un grand nombre d'édifices, et notamment certaines hautes cheminées, auraient été renversés. Il y a donc une certaine présomption que la formule ci-dessus donne des résultats exagérés.

Pour s'en assurer et déterminer au moins un maximum, la Société de la Tour, sur la proposition de M. Kœchlin, son ingénieur, fit installer des appareils imaginés par lui, sur les extrémités des grandes poutres en croix du sommet.

Ces appareils, au nombre de 6 (Voir fig. 222), sont disposés de manière à se présenter normalement au vent pour huit directions différentes, c'est-à-dire qu'un appareil fait avec le suivant un angle de 45°. Chaque appareil se compose de 5 parallélipipèdes en fonte dont les dimensions et la stabilité sont calculées de manière qu'ils soient renversés par un vent d'une intensité déterminée. Ces blocs, faits avec grand soin comme exactitude des dimensions et netteté des arêtes, sont placés l'un à côté de l'autre; ils sont établis pour être renversés, l'un sous un effort de 50 *kg* par mètre carré, les autres sous des efforts croissants de 100, 150, 200 et 250 *kg*. A cet effet, leurs dimensions sont de 0,20×0,20 en surface et les épaisseurs sont de 37,4, 52,8, 64,7, 75 et 83,5 *mm*. Ils sont disposés sur un châssis léger formant une tablette surélevée de 0,25 *m* portée par des pieds entre lesquels le vent passe librement. Les résultats obtenus par les appareils qui donnent à 50 *kg* près l'effort maximum cherché, fournissent des indications exactes au moins en ce qui concerne l'effort qui a produit le renversement, puisque l'on met en jeu un moment de stabilité connu qui ne peut être détruit que par un effort déterminé. Une chaînette en fer empêche que les blocs ne soient projetés au loin.

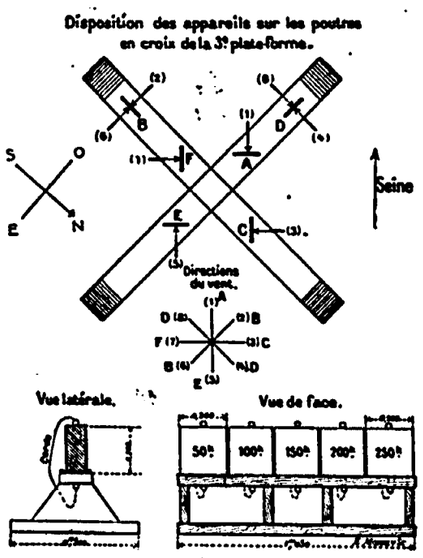


Fig. 222.

Or, sous la grande tempête de 1894, les anémomètres ont enregistré une vitesse de 45 *m* par seconde qui représente par mètre carré un effort de 253 *kg*, si on adopte le coefficient K=0,125. Si ce coefficient était exact, tous les blocs eussent dus être culbutés. Au contraire, avec le coefficient de 0,07 déterminé par les expériences de MM. Cailletet et Colardeau, l'effort maximum ne correspond qu'à 141,75 *kg* par mètre carré, de sorte que deux blocs seulement devaient être renversés. C'est précisément ce dernier cas qui s'est présenté : les blocs de 50 et de 100 *kg* ont seuls été renversés, et les autres sont restés debout. La pression du vent est donc restée inférieure à 150 *kg* au lieu des 253 *kg* que l'on pouvait prévoir.

Ces conclusions sont, au point de vue pratique, très satisfaisantes et donnent toute tranquillité au sujet des pressions adoptées dans les calculs de constructions métalliques en général et de la Tour en particulier; elles montrent que ces pressions sont exagérées.

Nous devons ajouter que c'est la seule fois, le 12 novembre 1894, que le bloc de 100 *kg* soit tombé. Celui de 50 *kg*, au contraire, a été fréquemment culbuté pour des vitesses moyennes de 16 à 25 *m* données par les enregistreurs; ce qui montre que les vitesses maxima non enregistrées ont pu être notablement plus élevées.

Avec le coefficient de 0,07, les vitesses correspondantes aux pressions sont les suivantes :

P= 50 *kg*	V = 26,7 *m*
100	37,7
150	46,0
200	53,4
250	59,6

Ces dernières vitesses n'étant jamais atteintes, il y aurait avantage à supprimer les blocs de 200 et de

250 *kg* et à intercaler de nouveaux blocs pour 25, 75 et 125 *kg*, de manière à obtenir des résultats plus rapprochés. C'est probablement ce que nous réaliserons dans une prochaine installation, où nous nous proposons de surélever davantage encore les blocs au-dessus des obstacles inférieurs, en essayant de les orienter suivant la direction exacte du vent.

Quant aux remous qui se produisent sur la face opposée au vent et qui ont une tendance à diminuer l'effort de renversement, en créant en arrière une sorte de vide, il sera probablement facile de trouver des dispositions pour les supprimer.

Il faut remarquer cependant qu'ils se produisent dans les cas les plus fréquents de la pratique, au moins en ce qui concerne les constructions métalliques où le vent rencontre surtout des surfaces ayant une faible épaisseur.

III. — Déplacements du sommet mesurés par visées directes.

Pour mesurer ces déplacements, on a installé en saillie sur la terrasse de la troisième plate-forme et sur l'angle côte Est, une mire en tôle vernie dont la face inférieure regardant le pilier Est portait des anneaux concentriques de 20 *mm* de largeur, alternativement rouges et blancs. Le nombre de ces anneaux était de 10 et leur diamètre extrême de 0,40 *m*. Ces anneaux étaient numérotés et étaient divisés en secteurs par les huit divisions du quadrant.

Cette mire convenablement orientée était observée à l'aide d'un théodolite fixé sur un solide massif de maçonnerie établi à la base du pilier Est. Il avait été réglé une fois pour toutes par un temps calme, sans soleil et à une température d'environ 10°, de telle sorte que le croisement des fils du réticule coïncidât avec le centre de la mire. Quand un déplacement se produisait, le centre des réticules venait se projeter sur l'un des cercles ou entre deux cercles concentriques ; on en lisait le numéro et on notait la position sur le secteur correspondant, laquelle était immédiatement rapportée, aussi approximativement que possible, sur un diagramme en papier représentant la mire à l'échelle réduite.

De 1893 à 1895, pour noter les déplacements dus à la température, on a fait d'une manière à peu près régulière trois observations par jour : à 7 heures du matin, à midi et à 7 heures du soir. On a fait en outre, accidentellement, quelques observations supplémentaires, quand il se présentait de fortes températures. Pendant cette même période, et toutes les fois que des coups de vent se produisaient, on observait les déplacements avec une grande lunette de 2,50 *m* de distance focale, et on reproduisait sur le papier, aussi exactement que possible, les dimensions et la position de la courbe en forme d'ellipse, parcourue sur la mire par le croisement des fils du réticule.

Cette série d'observations a donné lieu à un grand nombre de diagrammes dont nous nous bornerons à examiner quelques-uns.

§ 1. — Déplacements dus au vent.

Les diagrammes qui les indiquent sont de beaucoup les moins nombreux, d'abord parce que les coups de vent, qui seuls agissent sur la Tour d'une façon sensible, sont assez rares, puis parce qu'ils se produisent le plus souvent pendant les heures de nuit auxquelles aucune observation n'a été faite. Même pendant le jour, la mire est souvent masquée par la pluie qui accompagne, assez habituellement, les grands vents.

On a pu cependant, à plusieurs reprises, constater que sous l'effet du vent le sommet décrit à peu près une ellipse dont le centre varie avec la position du sommet à ce moment (position due aux circonstances de température, ainsi qu'il sera indiqué plus loin) et dont le grand axe est en rapport avec la vitesse du vent.

Ainsi le 20 décembre 1893 (Voir fig. 223) entre 11 heures et midi, l'un des jours pendant lesquels le déplacement a été maximum, le grand axe de cette ellipse était de 0,10 *m* et son petit axe de 0,06 *m*. La direction du vent était Sud et le maximum moyen a été de 31,8 *m* ; mais la vitesse réelle donnée par l'appareil à indications instantanées a été beaucoup plus grande et a atteint 44 *m*. Il est remarquable qu'à cette vitesse maxima, qui a eu lieu à $11^h25'$, l'ellipse correspondante avait un grand axe de 0,06 *m* seulement. Les énormes à-coups qui se produisaient à ce moment avaient ainsi un moindre effet de déplacement que ceux dus à un vent plus continu.

Dans le grand coup de vent du 12 novembre 1894, l'observation a été faite de 3 à 4 heures. La vitesse moyenne a varié à ce moment de 27,6 *m* à 30 *m* avec une vitesse maxima absolue de 42,50 *m* (Voir fig. 224). Le grand axe de l'ellipse a été de 0,08 à 0,06 *m*, le petit axe de 0,04 *m*. On a aussi constaté comme précédemment que c'était sous les grands à-coups, que le déplacement était le moindre ; il n'atteignait que 0,05 *m*. Le fort de la tempête a eu lieu à 6ʰ12' (vitesse moyenne maxima 42 *m*), mais à ce moment le déplacement n'a pas été mesuré, non plus que la vitesse absolue qui est peut-être allée jusqu'à 50 *m*.

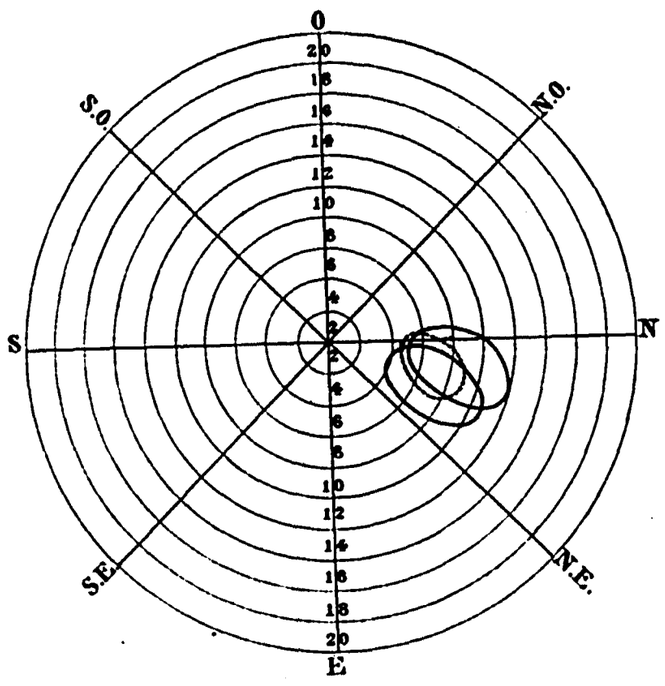


Fig. 223.

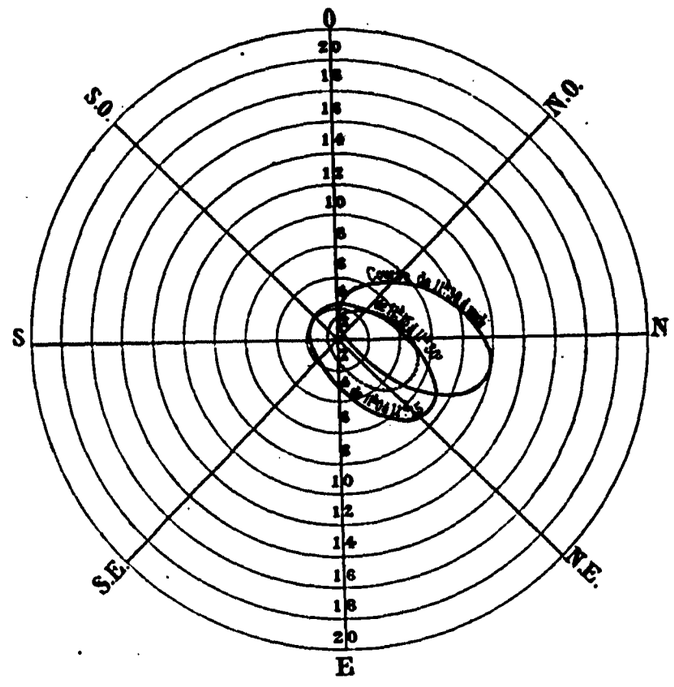


Fig. 224.

Le déplacement de 0,10 *m* est le maximum observé. Sous les vents violents ordinaires, le déplacement n'est guère que de 0,06 à 0,07 *m*.

Il est très inférieur à celui que le calcul faisait prévoir. Il y a donc presque certitude que les prévisions faites pour l'action du vent sont très supérieures à la réalité. Nous l'avons déjà constaté pour l'élévation de la pression par mètre carré. Il est probable qu'il en est de même pour l'évaluation des surfaces exposées au vent.

§ 2. — Déplacements dus à la température.

Nous avons dit que la position originelle du théodolite avait été fixée en choisissant une journée sans vent, un temps couvert et une température uniforme de 10°, puis en faisant coïncider le zéro de la mire avec le centre du réticule.

Les mêmes circonstances se sont reproduites le 26 décembre 1893 et pendant toute la journée la Tour est demeurée stationnaire, ce centre correspondant au zéro de la mire.

Par d'autres temps couverts, mais avec une température plus élevée (15° à 18°), les observations combinées des 6 et 7 juin 1893 ont donné des déplacements très faibles ; la mire s'est déplacée le matin par rapport au centre du réticule de 0,04 *m* dans la direction O. et est revenue le soir dans la même position, en se déplaçant extrêmement peu à midi.

Mais quand la chaleur solaire agit sur la Tour, par les jours de beau temps, les déplacements prennent une grande amplitude. Nous prendrons comme exemple les observations combinées des 15 et 16 août 1894, que nous représenterons par le graphique ci-contre (fig. 225), dans lequel le déplacement de la mire par rapport au réticule fixe est représenté à l'échelle du quart. A 5 heures du matin, le centre de la mire est placé sur la ligne O. à 4 *cm* du centre ; il reste sur cette ligne jusqu'à 8 heures en atteignant 13 *cm*. Il s'en éloigne du côté N. en atteignant 15 *cm*. Il se rapproche alors du centre, dans le secteur N.-O., au fur et à mesure de la marche du soleil, qu'il semble fuir. A 3 heures, il est dans la ligne N. à une distance de 7 *cm*. Le mouvement de rapprochement continue dans le quadrant N.-E. ; à partir de 5 heures et à une

distance de 6 *cm*, le réticule revient franchement au centre qu'il doit occuper vers 8 heures du soir ; la course totale est d'environ 24 *cm*, parallèlement à l'axe E.-O. et de 10 *cm* par rapport à l'axe N.-S. La Tour semble donc en quelque sorte fuir devant le soleil et s'incliner dans le quadrant N.-O., ce qui est naturel, puisque les arêtes regardant le soleil sont les plus échauffées, et en se dilatant davantage portent le sommet de la Tour du côté opposé.

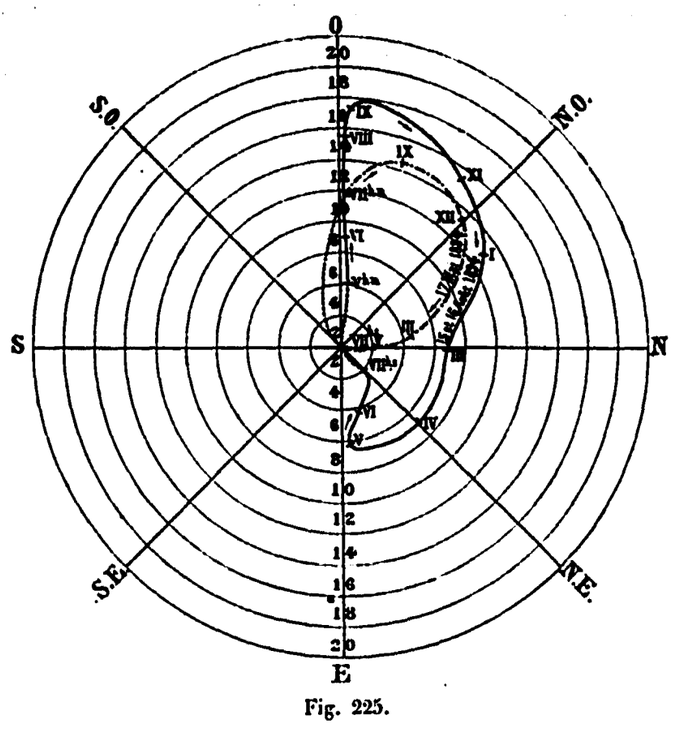


Fig. 225.

Les courbes sont assez souvent plus simples ; telle est celle du 17 mai 1894, qui est comprise tout entière dans le quadrant N.-O. (Voir fig. 225) et dont l'amplitude est de 12 *cm*. On peut la considérer comme une courbe moyenne par beau temps.

Quand, par une belle journée, le soleil se voile avec des alternatives, ces courbes deviennent bien moins régulières ; les mouvements d'allongement et de torsion de la Tour suivent ces alternatives d'une façon très sensible et les rapprochements ou les éloignements du centre coïncident avec les refroidissements ou les échauffements dus à l'action solaire.

En résumé, on peut dire que le sommet marqué par la tige du paratonnerre est à peu près constamment en mouvement ; ce mouvement est surtout accentué pendant le milieu de la journée, et ce n'est que vers les heures du lever et du coucher du soleil qu'il possède une fixité relative ; au milieu de la nuit seulement, il doit être tout à fait immobile.

Ce déplacement du sommet rend extrêmement difficile de s'assurer de la parfaite verticalité de la Tour. Cependant, en mai 1893, M. Muret, géomètre de la Ville de Paris, a procédé avec le plus grand soin à cette opération. Il n'a trouvé qu'un écart tout à fait insignifiant qu'il attribue lui-même à un effet de température.

IV. — Repérage du sommet par les méthodes géodésiques.

M. le Général Bassot, directeur du Service géographique au Ministère de la Guerre, a procédé, sur la demande de la Commission de surveillance de la Tour, présidée par M. Mascart, à des mesures géodésiques extrêmement précises, ayant pour but de faire un repérage exact du sommet, afin de pouvoir vérifier ultérieurement l'existence d'un déplacement. Ces travaux ont fait l'objet d'une communication à l'Académie des Sciences (6 décembre 1897), dont nous reproduisons des extraits.

En avril 1896, la Commission de surveillance de la Tour Eiffel, présidée par notre confrère M. Mascart, demanda au Service géographique de l'Armée de faire procéder au repérage du sommet de la Tour et de vérifier par des observations périodiques si ce sommet subit quelque déplacement.

La solution de ce problème a conduit à des résultats assez curieux et qui me paraissent dignes d'être signalés à l'Académie.

Il est évident tout d'abord qu'en présence d'une masse métallique aussi considérable, soumise aux effets des agents atmosphériques et en particulier de la chaleur solaire, il fallait s'attendre à voir le sommet de la Tour constamment en mouvement ; les dilatations inégales des arêtiers, inégalement exposés aux influences solaires aux différentes heures de la journée, doivent produire, en effet, une sorte de torsion de ce sommet, phénomène analogue à celui que l'on a déjà remarqué sur les pylônes en bois, servant de signaux géodésiques.

Mais quelle est l'amplitude de l'oscillation et comment la déterminer ?...

Le procédé que nous avons employé est le suivant :

On a d'abord fondé un repère invariable sur le sol, près du pied de la verticale du paratonnerre, puis on a choisi trois stations extérieures à la Tour, desquelles on puisse viser, au moyen de lunettes décrivant un plan vertical, successivement le repère et le paratonnerre. En chaque station on a installé un cercle méridien portatif, de telle manière que le champ de la lunette comprit le repère et le paratonnerre. Avec des instruments bien réglés, on pouvait ainsi, au moyen de la vis micrométrique de l'oculaire, mesurer avec une haute précision, en chaque station, l'angle existant entre les deux plans de visée.

Au préalable, pour avoir tous les éléments nécessaires aux calculs de réduction, on a mesuré une petite base, relié les stations au repère à l'aide d'une triangulation, pris les distances zénithales ; enfin on a orienté une des directions par l'observation du Soleil.

Aux trois stations, les observations étaient simultanées et rythmées ; en chacune d'elles, on pointait, à heures convenues, le paratonnerre, puis le repère, puis le paratonnerre, et ainsi de suite, chaque série comprenant quatre pointés sur le paratonnerre et trois sur le repère ; les séries étaient espacées de demi-heure en demi-heure.

Les mesures ainsi faites ont été traduites sur un schéma à échelle nature et rapportées au repère fixe. L'intersection deux à deux des plans passant par le paratonnerre donne finalement pour chaque série un petit chapeau, dont le centre de gravité fournit la position du paratonnerre au moment de l'observation.

Remarquons en passant que la grandeur du chapeau permet d'évaluer l'erreur d'observation ; il résulte de nos opérations que chaque position du paratonnerre est déterminée avec une erreur moyenne de $\pm$ 3*mm* seulement. C'est grâce à cette précision que nous avons pu étudier avec certitude le mouvement du sommet de la Tour, qui est en réalité très faible, et mettre en évidence son oscillation périodique.

Pour chaque journée d'observation, on a finalement un dessin figuratif donnant de demi-heure en demi-heure le pied de la verticale du paratonnerre, et chaque position du sommet de la Tour se trouve définie par sa distance horizontale au repère fixe et par l'azimut vrai de la ligne joignant sa projection au repère.

En réunissant par une courbe les positions successives du paratonnerre, on fait ressortir le mouvement progressif de la Tour pendant la durée des observations.

Les expériences ont été faites en août 1896, en mai et en août 1897. Il eût été désirable, en principe, de n'observer que par temps calme et couvert pour obtenir le minimum de déviation de l'axe de la Tour et en conclure son repérage avec plus de certitude. Mais cette condition était difficile à réaliser, nos postes d'observation n'ayant pas été organisés en observatoires permanents ; il eût fallu d'ailleurs immobiliser pendant trop longtemps le personnel assez nombreux, nécessaire au travail, qui avait à satisfaire à d'autres nécessités impérieuses de service. En réalité, nous avons fait les observations un certain nombre de jours, quelque temps qu'il fît, et les résultats que nous avons trouvés démontrent qu'il n'est pas indispensable d'avoir un ciel couvert pour l'étude dont il s'agit.

Les 21 mai et 25 août derniers, nous avons pu faire les expériences d'une manière presque continue depuis le matin jusqu'au soir. Nous en donnons les résultats ci-après, à titre d'exemple.

De l'examen des courbes de ces deux journées, il ressort que le sommet de la Tour a des mouvements plus rapides et que les variations en distance et en azimut sont plus considérables le matin que dans l'après-midi...

Les courbes du 21 mai (fig. 226) et du 25 août (fig. 227) affectent une forme qui se rapproche assez d'un 8 non fermé. Évidemment, la courbe des 24 heures doit être plus complexe, et cela se conçoit : vers la fin de la nuit, le paratonnerre doit avoir de faibles mouvements ; dès que la chaleur solaire se fait sentir, les mouvements deviennent rapides ; on voit le paratonnerre se rapprocher du repère, puis s'en éloigner ; dans l'après-midi, quand l'effet total de la chaleur s'est produit, il y a un moment d'équilibre où les mouvements sont faibles : la nuit venue, avec le premier refroidissement nocturne, les mouvements doivent encore une fois être rapides, puis redevenir faibles quand arrive l'équilibre nocturne.

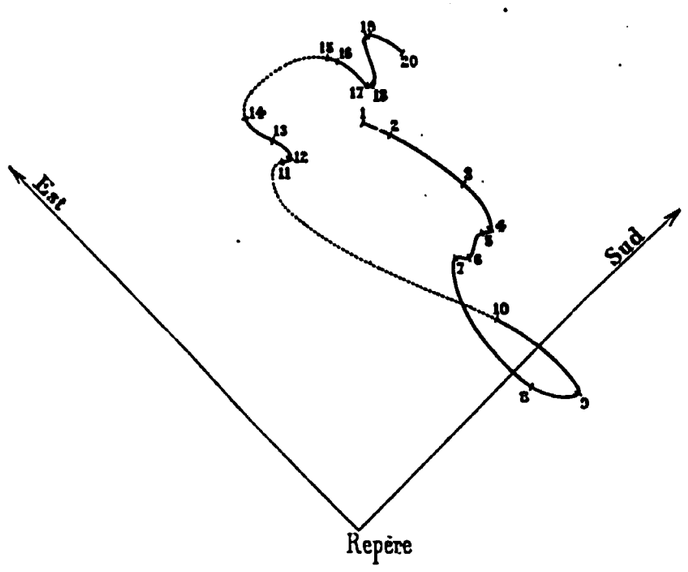


Fig. 226. — Courbe du 21 mai 1897.

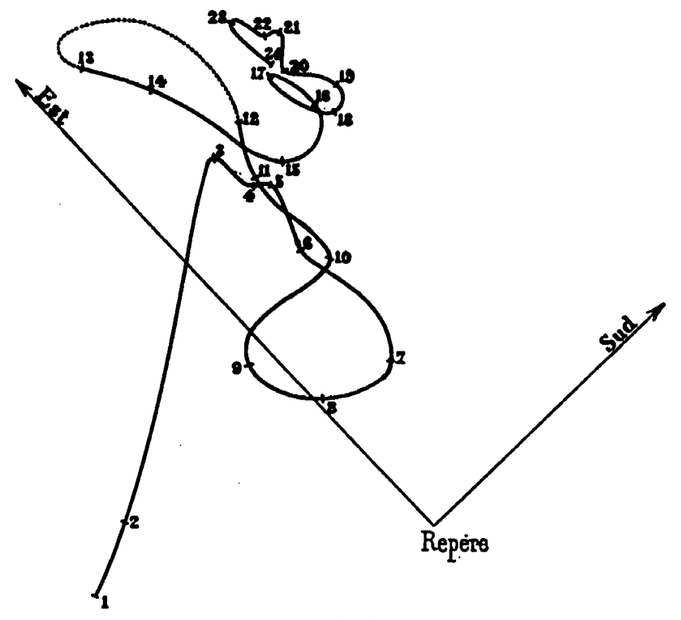


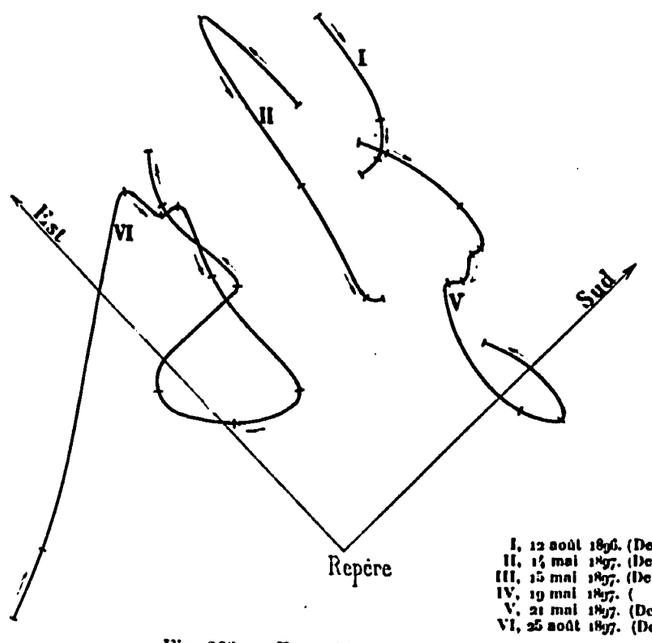
Fig. 227. — Courbe du 25 août 1897.

Journée du 21 mai 1897.

N° des séries.	État du ciel.	Heures.	D.	Azimuts (1).	e.
		h m	mm	°	
1.....	Couvert, temps calme.	4,30 M.	66	352,5	5,5
2.....	Id.	5, 0	65	356,5	4,5
3.....	Id.	5,30	59,5	370	6
4.....	Id.	6, 0	54	378	5
5.....	Soleil, léger vent E.	6,30	53	376	1,5
6.....	Voilé.	7, 0	48	376	3
7.....	Soleil.	7,30	47,5	373	3
8.....	Soleil, vent.	8, 0	37	6,5	3
9.....	Soleil.	8,30	42,5	15	3,5
10.....	Temps couvert.	9, 0	41	388	4
11.....	Soleil.	Midi S.	61	338,5	2
12.....	Voilé, vent S.-E.	Midi 30	61,5	340,5	1,5
13.....	Id.	1, 0	60,5	338	2
14.....	Temps voilé.	1,30	69,5	334	1,5
15.....	Temps voilé, vent.	5, 0	77	347,5	3
16.....	Couvert, vent S.-E.	5,30	76,5	348,5	2
17.....	Id.	6, 0	72,5	352,5	3,5
18.....	Id.	6,30	72	354	3,5
19.....	Soleil.	7, 0	80	352,5	3,5
20.....	Couvert, vent S.-E.	7,30	78,5	357,5	4,5

Journée du 25 août 1897.

N° des séries.	État du ciel.	Heures.	D.	Azimuts.	e.
		h m	mm	°	
1.....	Soleil très faible.	5,30 M.	56	235	(1)
2.....	Temps couvert.	6, 0	50	248,5	(1)
3.....	Soleil.	6,30	69	314,5	2,5
4.....	Id.	7, 0	61	317,5	0,5
5.....	Soleil faible.	7,30	61	320	<0,5
6.....	Id.	8, 0	49	320	1
7.....	Soleil, vent fort.	8,30	27	331	3
8.....	Id.	9, 0	27	303	1
9.....	Id.	9,30	40	292,5	1,5
10.....	Nuages.	10, 0	46	325,5	4
11.....	Id.	10,30	63,5	318	<0,5
12.....	Nuages, vent fort.	11, 0	72	320	1,5
13.....	Couvert, pluie violente.	1, 0 S.	93	307	5,5
14.....	Pluie.	1,30	83	312	0,5
15.....	Couvert.	2, 0	63	324	1
16.....	Pluie.	2,30	70,5	331,5	(1)
17.....	Couvert.	3, 0	78	326	1
18.....	Id.	3,30	68	333,5	2
19.....	Id.	4, 0	72,5	335	1
20.....	Id.	4,30	77	328	1,5
21.....	Id.	5, 0	83	329	1
22.....	Id.	5,30	83	327	<0,5
23.....	Id.	6, 0	87	324	1,5
24.....	Id.	6,30	78,5	327	<0,5



I, 12 août 1896. (De 5h30 à 8h15 du matin et de 5h30 à 7h00 du soir.)
II, 14 mai 1897. (De 8h00 à 10h10 — 4h30 à 7h00 — .)
III, 15 mai 1897. (De 6h30 à 8h10 — .)
IV, 19 mai 1897. (De 3h00 à 6h00 — .)
V, 21 mai 1897. (De 4h30 à 9h10 du matin et de 12h00 à 7h30 — .)
VI, 25 août 1897. (De 5h30 à 11h00 — 1h15 à 6h30 — .)

Fig. 228. — Ensemble des courbes du matin.

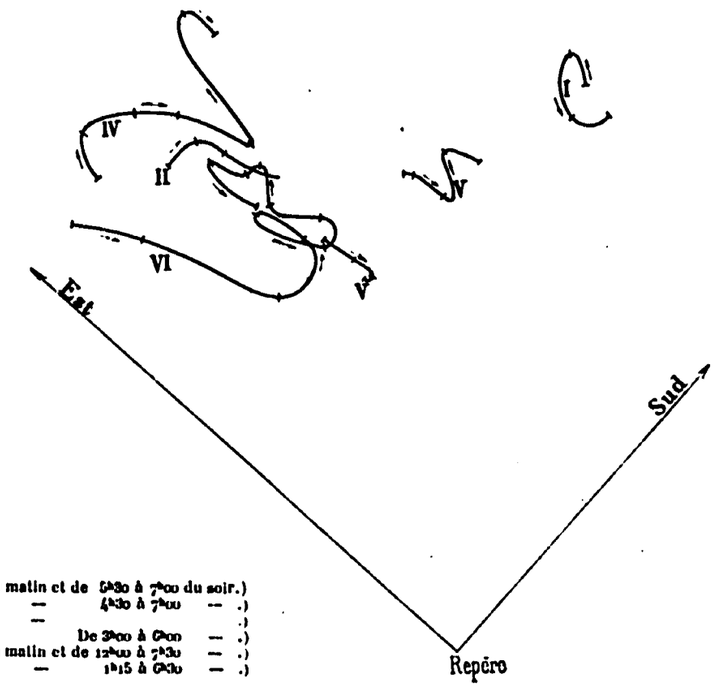


Fig. 229. — Ensemble des courbes de l'après-midi.

(1) Les azimuts sont comptés géodésiquement, du sud au nord en passant par l'ouest.

(1) Séries à deux recoupements seulement.

D'autres observations ont été faites en août 1896 et en mai 1897 ; mais celles-ci ne comportent que quelques mesures faites le matin et le soir ; elles n'ont pas, par conséquent, la continuité des journées précédentes. Elles confirment néanmoins les conclusions que nous venons d'énoncer sur une plus grande rapidité des mouvements du sommet de la Tour dans la matinée, et sur sa fixité relative dans les heures du soir.

En condensant sur un même schéma toutes les courbes du matin, puis, sur un autre, toutes les courbes du soir, on a les figures ci-dessus 228 et 229.

Les remarques qui précèdent conduisent à cette conclusion que, pour vérifier par des observations périodiques si le sommet de la Tour Eiffel subit quelque déplacement, il suffit de faire les observations pendant la période diurne où les mouvements sont les plus faibles, c'est-à-dire le soir, pendant les deux ou trois heures qui précèdent le coucher du soleil. On n'obtiendra évidemment qu'une valeur approchée de la position absolue du paratonnerre par rapport au repère fixe, mais ce renseignement suffira pour déceler un déplacement important de la Tour, s'il s'est produit dans l'intervalle des époques d'observation.

Partant de ce principe, nous avons reconnu que le sommet de la Tour n'a subi aucun déplacement appréciable entre le mois d'août 1896 et le mois d'août 1897 : sa projection se trouve, le soir, à 9 *cm* environ du repère fixe du sol, dans le quadrant Sud-Est, sous un azimut moyen de 45° par rapport au Sud.

Nous avons reconnu également, par l'ensemble de nos observations, que la distance entre la projection du paratonnerre et le repère fixe n'a oscillé qu'entre des limites très faibles, de 2,7 *cm* à 11 *cm*, mais que les variations en azimut de la ligne qui joint ces deux points s'étendent sur plus d'un quadrant. La torsion diurne du sommet de la Tour est donc très nettement mise en évidence.

Si l'on voulait se servir de la Tour comme d'un signal géodésique et y faire un tour d'horizon, il serait par suite nécessaire d'adopter, comme sur les pylônes en bois, une méthode particulière d'observation pour éliminer l'erreur provenant de cette torsion.

V. — Manomètre à air libre pour les hautes pressions.

Dès l'origine de la construction de la Tour, je m'étais préoccupé de son application à la construction d'un grand manomètre à air libre et à mercure permettant de mesurer directement des pressions de 400 atmosphères. Au point de vue scientifique, un tel manomètre devait, par sa haute précision, être précieux pour l'étalonnage des manomètres à azote ou à hydrogène destinés aux expériences de laboratoire ; au point de vue industriel, il devait offrir une utilité incontestable pour la vérification des manomètres métalliques.

Aussi, après l'achèvement de la Tour, je fis établir ce manomètre d'après le projet qui en a été fait par M. L. Cailletet, membre de l'Institut, si connu par ses beaux travaux sur la liquéfaction des gaz.

Je donne ci-dessous la description de cet appareil, d'après la communication faite par M. Cailletet à l'Académie des Sciences en 1891.

Disposition générale. — Les manomètres à air libre sont les seuls instruments qui permettent d'obtenir pratiquement, d'une façon précise et avec une approximation constante, la mesure des pressions des gaz ou des liquides.

C'est pour cette raison que j'avais installé, d'abord sur le penchant d'un coteau, puis, plus tard, au puits artésien de la Butte-aux-Cailles, un manomètre à air libre de plus de 100 *m* de hauteur.

Cette disposition a été imitée depuis par plusieurs physiciens. Mais les difficultés de manœuvre et d'observation d'un instrument installé dans ces conditions laissent toujours subsister des incertitudes sur la précision des résultats.

La construction de la Tour Eiffel offrait des conditions exceptionnelles pour l'établissement d'un manomètre à air libre de 300 *m* dont tous les organes, liés d'une façon invariable à la Tour elle-même, fussent accessibles à l'observateur sur toute son étendue. Grâce à la libéralité de M. Eiffel, la construction de cet instrument est actuellement un fait accompli.

La pression de 400 atmosphères, que mesure un pareil manomètre, ne peut être maintenue dans un tube de verre. On a dû recourir à un tube d'acier doux de 4 *mm* environ de diamètre intérieur, relié par sa base à un récipient contenant du mercure. En comprimant, à l'aide d'une pompe et d'après le dispositif bien connu, de l'eau sur ce mercure, on peut l'élever graduellement jusqu'au sommet de la Tour.

La direction inclinée des piliers de la Tour ne permettait pas l'installation du tube d'acier dans une direction verticale. De la base de la Tour à la première plate-forme, c'est-à-dire jusqu'à une hauteur de 60 *m* environ, ce tube est fixé contre le plan incliné d'un des rails de l'ascenseur. Un escalier en fer le suit dans toute sa longueur.

Entre la première et la deuxième plate-forme, c'est-à-dire sur une hauteur à peu près égale à la précédente, l'appareil manométrique est installé contre l'escalier hélicoïdal. Celui-ci se divisant en plusieurs tronçons, non superposés sur une même verticale, à cause de l'obliquité du pilier, le tube manométrique lui-même se divise en autant de parties et s'incline pour passer d'un de ces escaliers à l'autre, en conservant une pente assez grande pour assurer la descente du mercure au retour.

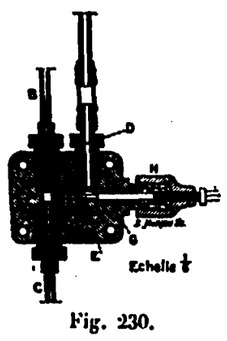


Fig. 230.

Enfin, de la deuxième plate-forme au sommet, le tube est disposé de la même manière contre les deux grands escaliers verticaux en hélice.

L'observation facile est donc assurée, comme on le voit, de la base au sommet.

Détail de l'appareil. — L'opacité du tube d'acier s'opposant à la lecture directe du niveau du mercure, on a disposé, à des distances égales (de 3 en 3 *m* environ), sur le trajet de ce tube, des robinets A à vis conique dont chacun communique avec un tube de verre vertical. Ce tube est muni d'une échelle graduée, soigneusement tracée sur bois vernis, qui n'éprouve que des variations de longueur insignifiantes par les changements de température. Lorsqu'on ouvre un de ces robinets, on met l'intérieur du tube d'acier en communication avec le tube de verre dans lequel peut alors pénétrer le mercure.

La figure 230 représente le détail d'un de ces robinets. BC est le tube d'acier, D est l'ajutage métallique auquel le tube de verre s'adapte par un caoutchouc, EF est la tige filetée dont la pointe conique E ouvre ou ferme l'entrée du mercure dans le tube de verre. Des rondelles de cuir G, comprimées par le serrage de l'écrou H, assurent l'étanchéité de l'appareil.

De la base de la Tour à la première plate-forme, ainsi que nous l'avons dit, la direction du tube d'acier est inclinée. Le croquis à gauche de la figure 231 indique la disposition des robinets et des tubes de verre, contre l'escalier de service, dans cette partie de l'appareil.

Le croquis à droite de la même figure représente ces divers organes, du premier étage au sommet. Les tubes et robinets sont protégés par un ensemble de coffres en bois dont les deux faces opposées s'ouvrent pour permettre les observations.

Pour réaliser, à un moment donné, une pression déterminée, il suffit d'ouvrir le robinet du tube de verre qui porte la division correspondant à cette pression ; on fait agir la pompe hydraulique et, quand le mercure arrive au robinet, il s'élève en même temps dans le tube de verre et dans le tube d'acier. On l'amène alors exactement à la division voulue, en agissant très lentement sur la pompe hydraulique. Si, en opérant ainsi, on dépasse le niveau recherché, on laisse échapper une certaine quantité d'eau par un robinet de décharge placé dans le voisinage de la pompe. Le liquide qui s'échappe ainsi pénètre dans un tube de verre vertical gradué où sa hauteur indique l'abaissement correspondant de la colonne de mercure.

Cette manœuvre, qui se fait dans le laboratoire installé à la base de l'appareil (Voir fig. 233), est rendue très simple au moyen d'un téléphone que l'observateur emporte avec lui, et qui, à chaque robinet, peut être mis en relation avec le poste inférieur.

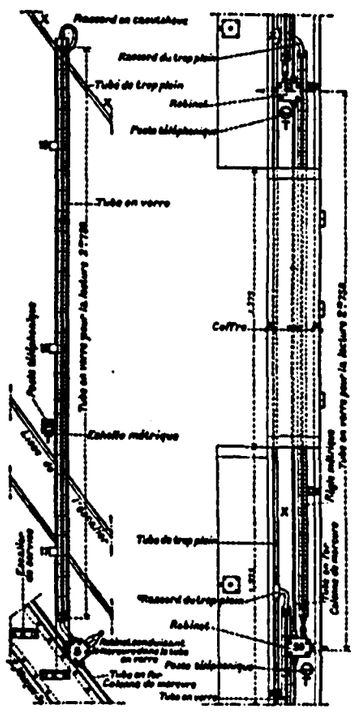


Fig. 231. — Disposition des robinets et des tubes de verre du sol au 1er étage, et du 1er étage au sommet.

Dans la figure 231, T représente les pièces de contact destinées à établir la communication téléphonique. (Voir également figure 232 ci-dessous.)

Si, pour une cause quelconque, le mercure vient à dépasser le sommet d'un des tubes de verre, il se déverse dans un autre tube de retour en fer, qu'on

Fig. 232. — Escalier du sol au 1er étage, le long duquel est établi le manomètre. T T T, tubes de verre verticaux fixés au tube manométrique.

aperçoit en XX dans les figures ci-jointes et qui le ramène à la base de l'appareil.

Les échelles graduées qui accompagnent chaque tube de verre, n'étant pas toujours superposées verticalement, on a opéré de la manière suivante pour raccorder leurs graduations.

La cote de chaque point de la Tour est connue d'une manière très exacte et a fourni un certain nombre de points de repère. Pour le raccordement de deux règles graduées consécutives, on se servait de deux vases communicants remplis d'eau, réunis par un tube de caoutchouc et permettant de trouver, pour la base de chaque échelle, le plan horizontal correspondant au niveau supérieur de l'échelle précédente. La graduation ainsi faite s'est trouvée d'accord avec la cote des diverses parties de la Tour.

Laboratoire. — Dans le pilier Ouest de la Tour, à la base du manomètre, est installé le laboratoire (Voir fig. 233) qui contient la pompe foulante hydraulique, le récipient à mercure, le poste téléphonique et les autres accessoires. Parmi ceux-ci, nous devons signaler spécialement un manomètre métallique de grande dimension M, mis en relation avec le liquide comprimé. Ce manomètre porte une première graduation en atmosphères; une seconde graduation correspond au numéro d'ordre des divers robinets. On sait ainsi immédiatement, par avance, dans quel tube de verre devra s'élever le mercure sous une pression donnée, ce qui permet de trouver sans hésitation le robinet à ouvrir pour avoir la position exacte de son niveau.

Corrections. — Le calcul de la valeur exacte de la pression, d'après la hauteur de la colonne de mercure soulevée, nécessite pour chaque expérience un certain nombre de corrections qui exigent la connaissance de plusieurs éléments.

La température modifie la densité du mercure et fait varier la hauteur de la Tour et par conséquent du tube manométrique. Un calcul simple montre qu'un écart de température de 30° ne fait guère varier cette hauteur que de 1 *dm*, soit $\frac{1}{3.000}$ de sa valeur. La correction due à la densité variable du mercure est plus importante : elle serait environ de $\frac{1}{200}$ pour le même écart de 30°. La mesure de la température moyenne nécessaire à cette double correction est obtenue par la variation de la résistance électrique qu'elle communique au fil téléphonique qui suit la colonne mercurielle sur tout son parcours. Des thermomètres enregistreurs placés à chaque plate-forme donnent pour chaque expérience une indication suffisante.

Les autres éléments de correction sont la compressibilité du mercure, les changements dans la pression atmosphérique à mesure que la colonne s'élève.

M. Eiffel, en se chargeant de toutes ces dépenses et en mettant à ma disposition le personnel nécessaire à la construction, a tenu à montrer une fois de plus l'intérêt dévoué qu'il porte à la science. J'espère donc que l'Académie tiendra à s'associer aux sentiments de reconnaissance que je suis heureux d'adresser à M. Eiffel.

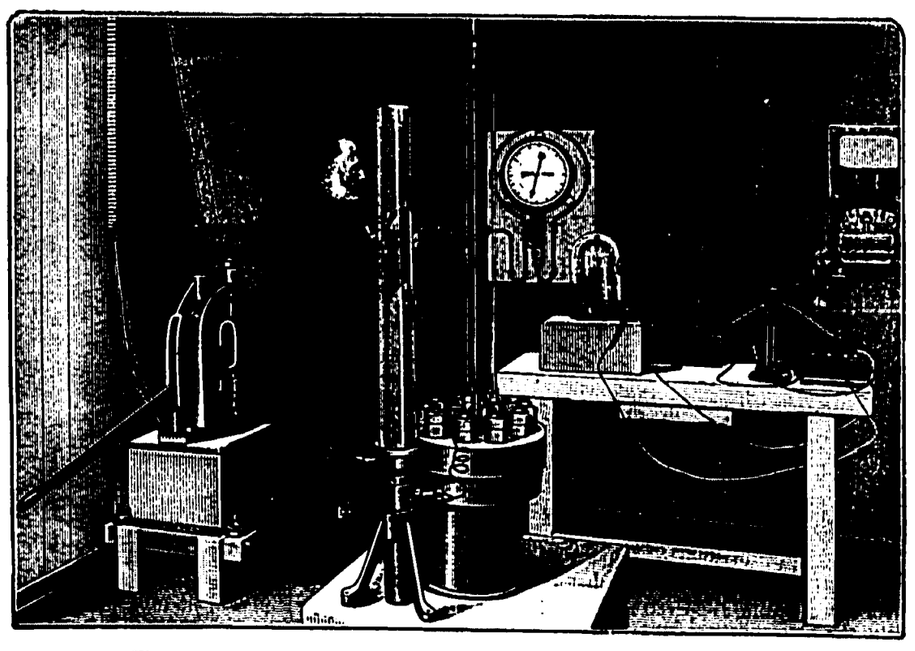


Fig. 233. — Laboratoire installé au niveau du sol dans le pilier Ouest.

Après l'achèvement de ces expériences, M. Cailletet nous a remis la note suivante résumant les résultats pratiques qu'il a obtenus :

« Les indications précises fournies par le manomètre établi à la Tour ont permis de graduer les manomètres métalliques à hautes pressions si employés maintenant dans les diverses industries.

« Les constructeurs de ces appareils ont actuellement des étalons gradués directement à la Tour, et qui leur permettent de graduer par comparaison les manomètres sortant de leurs ateliers.

« MM. Schaeffer et Budenberg nous ont fourni des manomètres métalliques de grandes dimensions et donnant des mesures de pression s'élevant à 400 atmosphères. Après plusieurs années, ces appareils ont conservé leur sensibilité et la précision de leurs indications.

« Il n'est pas inutile de rappeler que les manomètres métalliques qu'on trouvait autrefois dans le commerce donnaient des écarts dans leurs indications s'élevant souvent à 10 ou 12 p. 100.

« Je me suis également servi du manomètre de la Tour pour graduer un certain nombre de manomètres à gaz hydrogène. Ces appareils, à la seule condition d'être toujours observés à la même température, ce qu'on obtient en maintenant le tube de l'appareil dans une masse d'eau à température constante et exactement connue, donnent des déterminations d'une grande exactitude. J'ai pu ainsi éviter les manipulations assez longues de la mesure directe des pressions au moyen du grand manomètre à air libre, et, tout en restant dans mon laboratoire, mesurer avec la même précision les hautes pressions sous lesquelles j'opérais. Dans ce cas, je me servais de deux manomètres à hydrogène accouplés, et dont les indications simultanées se contrôlaient entre elles.

« C'est par cette méthode que, dans un travail entrepris, avec M. Colardeau, sur la tension de la vapeur d'eau jusqu'à son point critique, nous avons pu déterminer avec une grande précision les pressions correspondantes à chacune des températures observées. »

VI. — Télégraphie sans fil.

M. Ducretet a réalisé en 1898, du haut de la Tour, d'intéressantes expériences de télégraphie sans fil qui ont été communiquées à l'Académie des Sciences. Nous en reproduisons le compte rendu (7 novembre 1898) :

« Les essais de transmission entre la Tour Eiffel et le Panthéon, que j'ai commencés le 26 octobre, ont été suivis jusqu'à ce jour. La distance franchie est de 4 *km* et l'intervalle est occupé par un grand nombre de constructions élevées; les signaux reçus au Panthéon ont toujours été très nets, même par un brouillard assez épais; il est donc possible d'affirmer qu'avec les mêmes appareils cette distance pourrait être sensiblement augmentée.

« Le *poste transmetteur*, installé sur la troisième plate-forme de la Tour Eiffel, comprenait : une bobine de Ruhmkorff de 25 *cm* d'étincelle, actionnée par mon interrupteur à moteur et un interrupteur à main, pour forts courants, produisant les émissions intermittentes de décharges oscillantes entre les trois sphères d'un oscillateur. Une des sphères extrêmes de cet oscillateur était mise en communication avec l'extrémité isolée du *fil radiateur* suspendu dans l'espace jusqu'à la plate-forme intermédiaire; l'autre sphère extrême était reliée directement à la masse métallique de la Tour, jouant ainsi le rôle de *terre*.

« Dans ces conditions, la longueur de l'étincelle entre les sphères de l'oscillateur est beaucoup diminuée, sans doute parce que le fil radiateur, au voisinage de la Tour métallique, acquiert une grande capacité.

« L'*appareil récepteur* était installé au Panthéon, sur la terrasse au-dessus des colonnades.

« En se plaçant dans les conditions inverses, le Panthéon devenant *transmetteur* et la Tour Eiffel *réceptrice*, on n'obtient aucune réception d'ondes; le voisinage immédiat de la Tour métallique et du fil vertical collecteur annule l'effet des ondes qui devraient agir sur le radio-conducteur. »

Nous devons ajouter que ce dernier phénomène peut simplement tenir à certaines circonstances de l'expérience qu'il est possible d'écarter. Les essais faits sur les grands cuirassés, qui forment des masses métalliques bien plus considérables, semblent en fournir une preuve convaincante.

VII. — Aéronautique.

M. W. de Fonvielle a fait, dans le *Spectateur militaire* du 15 juillet 1890, le récit d'une ascension nocturne en ballon, dont nous extrayons les lignes qui suivent :

Le 26 juin dernier, à 8ʰ15ᵐ du soir, nous prenions place dans l'ascenseur du pilier Nord de la Tour Eiffel, en compagnie de quelques aéronautes. Notre but était de nous assurer s'il ne serait pas possible d'établir une communication télégraphique entre la terrasse de la troisième plate-forme et le ballon *le Figaro*, exécutant une ascension nocturne à l'usine de la Villette. Ce ballon de 3.800 m^3 portait quatre voyageurs en outre des aéronautes, MM. Jovis et Mallet.

Cette communication aérienne entre un ballon en ascension et la troisième plate-forme peut être établie de la façon la plus simple, au moins pendant la nuit, quand on aura fait quelques expériences et que l'on aura acquis la pratique indispensable.

Les expériences du 26 juin établissent ce résultat d'une manière tout à fait indiscutable.

Les appareils dont MM. Jovis et Mallet se sont servis dans l'expérience du 26 étaient formés de deux lampes de vingt bougies chacune, placées dans un réflecteur conique à fond plat, mobile autour d'un axe vertical. Le réflecteur conique pouvait être dirigé du côté de la Tour que l'on apercevait dans le lointain à cause de ses projecteurs et de son phare.

Nous avons suivi le ballon jusqu'à 11ʰ30ᵐ, moment où il se trouvait à une distance de 100 *km*, puisqu'il avait dépassé Château-Thierry. Rien n'était plus aisé que de maintenir le point lumineux dans le champ de la lunette.

L'éclairage de la nacelle peut être exécuté très facilement par des appareils meilleurs. Il suffit, en effet, de prendre un réflecteur parabolique et de placer à son foyer une lampe unique d'une puissance égale à celle de deux lampes de l'expérience du 26 juin, pour être dans des conditions lumineuses bien meilleures.

Nous avons aperçu très aisément les interruptions que M. Mallet a produites en couvrant de temps en temps la lumière avec sa casquette d'aéronaute. Il eût été beaucoup plus aisé de discerner ces signaux s'ils avaient été produits avec une clef de Morse donnant des interruptions instantanées et auxquelles il est possible d'imprimer un certain rythme.

Si on avait voulu expédier à l'aérostat des signaux Morse, on aurait dû se con-

tenter d'un seul projecteur. L'illumination de la Tour eût été moins brillante, mais les aéronautes n'auraient point eu de peine à retrouver la Tour et à voir les signaux qu'elle eût envoyés. En effet, le phare tricolore, dont l'intensité est bien moins vive, est resté visible jusqu'à 1 heure, moment où l'aérostat était à 150 *km* à vol d'oiseau de la Tour.

Il est bon d'ajouter qu'examiné avec une jumelle, il ressemblait alors à un simple phare à éclipses. Les rayons bleus et le rayon rouge avaient été absorbés par l'atmosphère.

A lui seul et sans autre secours, le phare de la Tour peut servir de signal pour guider un aérostat en ascension nocturne, qui chercherait à courir des bordées verticales dans les airs, afin de s'approcher de Paris, ou de s'en éloigner dans une direction donnée d'avance.

Un aéronaute qui, parti de Paris, voudrait y revenir, arriverait aisément à discerner le courant qui lui conviendrait pour courir des bordées dans le cercle de 100 à 150 *km* de rayon. Souvent, si le vent favorable l'abandonne, il pourra découvrir dans la région accessible de l'air plusieurs courants auxquels il lui sera possible de s'abandonner alternativement pour rectifier sa route.

Pendant la journée, la Tour pourra aussi rendre de grands services aux voyageurs aériens, mais elle s'apercevra à des distances beaucoup moindres. C'est surtout pendant la nuit que ses services acquièrent une portée surprenante. On pourrait également, dans une certaine mesure, songer à la télégraphie optique sans attendre le soir. Malheureusement, que de peines pour qu'un éclair tiré du soleil vienne frapper l'œil d'un voyageur occupant un siège dans la nacelle!

On doit déclarer bien haut que l'art des aéronautes, comme celui des astronomes, doit surtout s'exercer pendant la nuit. En effet, la navigation aérienne est en général beaucoup plus facile et plus sûre, lorsque l'on n'a pas dans le ciel cet immense perturbateur qui se nomme le soleil. La lumière que donne la lune, surtout lorsqu'elle est voisine de son plein, suffit très bien pour reconnaître une infinité de détails. Quand la lune est absente, l'électricité permet d'exécuter toutes les manœuvres. C'est certainement de nuit que j'ai exécuté mes ascensions les plus intéressantes, et cela bien avant que la Tour Eiffel ne vînt prêter le secours de son phare et de ses projections.

Un ballon complètement armé doit posséder même les moyens d'éclairer la terre et de lancer au besoin des sondes lumineuses qui permettent de voir tout ce qui se passe sur le sol.

L'œil de l'aéronaute acquiert une sensibilité très grande, et, même à hauteur considérable, il apercevra très bien les détails renfermés dans le cercle d'éclairement de sa nacelle. Pour tirer parti des lumières qu'il peut ainsi promener dans l'espace, il faut que la lampe servant aux projections lumineuses ne frappe jamais directement sa pupille : s'il est doué d'une bonne vue, et s'il possède des instruments d'optique accommodés à ces dispositions nouvelles, il pourra réellement accomplir des merveilles!

Ajoutons que le courant électrique produit une chaleur qui peut être utilisée dans la lutte contre le froid, un des plus grands ennemis que l'homme ait à combattre dans la conquête de l'air.

On voit donc que, si l'électricité ne possède pas une force motrice suffisamment légère pour lutter contre le vent, elle peut être d'un immense usage dans les excursions célestes.

VIII. — Origine tellurique des raies de l'oxygène dans le spectre solaire.

M. J. Janssen, membre de l'Institut et directeur de l'Observatoire d'astronomie physique de Meudon, a fait à l'aide des projecteurs de la Tour des expériences que les *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* du 20 mai 1899 rapportent en ces termes : .

« M. Eiffel, ayant mis très obligeamment la Tour du Champ de Mars à ma disposition pour les expériences et observations que je voudrais y instituer, j'ai eu la pensée de profiter de la source si puissante de lumière qui vient d'y être installée pour certaines études du spectre tellurique et, en particulier, celle qui se rapporte à l'origine des raies du spectre de l'oxygène dans le spectre solaire.

« Nous savons aujourd'hui qu'il existe dans le spectre solaire plusieurs groupes de raies qui sont dues à l'oxygène que contient notre atmosphère; mais on peut se demander si ces groupes sont dus exclusivement à l'action de notre atmosphère et si l'atmosphère solaire n'y entre pour rien, ou bien si leur origine est double; en un mot, si elles sont purement telluriques ou telluro-solaires.

« Pour résoudre cette question, on peut recourir à un certain nombre de méthodes.

« Une des plus sûres est celle de la vibration, dont l'origine remonte à la belle conception de M. Fizeau et qui a été appliquée par M. Thollon et perfectionnée par M. Cornu.

« Elle paraît d'une application assez difficile dans le cas présent.

« On peut aussi observer la diminution d'intensité que subissent les groupes à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère et, par des comparaisons aussi soignées que possible, et surtout par la grande pratique des observations, juger si la diminution d'intensité des raies permet de conclure à leur disparition complète aux limites de l'atmosphère. C'est la méthode employée dans la dernière expédition au massif du mont Blanc (Grands-Mulets).

« On peut encore procéder par une comparaison d'égalité en installant une puissante lumière à spectre continu à une distance de l'analyseur qui soit telle que l'épaisseur atmosphérique traversée représente l'action de l'atmosphère terrestre sur les rayons solaires aux environs du zénith.

« Or cette dernière circonstance s'est très heureusement trouvée réalisée par les situations respectives de la Tour Eiffel et de l'Observatoire de Meudon.

« La Tour est à une distance de l'Observatoire d'environ 7.700 *m*, qui représente à peu près l'épaisseur d'une atmosphère ayant même poids que l'atmosphère terrestre et une densité uniforme et égale à celle de la couche atmosphérique voisine du sol.

« En outre, la puissance considérable de l'appareil lumineux installé actuellement au sommet de la Tour permettait l'emploi de l'instrument qui m'avait servi à Meudon et aux Grands-Mulets pour le soleil.

« J'ai néanmoins fait usage d'une lentille collectrice devant la fente, afin d'amener le spectre à avoir une intensité tout à fait comparable à celle du spectre solaire dans le même instrument.

« Dans ces conditions, le spectre s'est montré d'une vivacité extrême. Le champ spectral s'étendait au delà de A (1).

« Le groupe B m'a paru aussi intense qu'avec le soleil méridien d'été.

« Le groupe A était également fort accusé.

« On distinguait encore d'autres groupes, et notamment ceux de la vapeur d'eau; leur intensité m'a paru répondre à l'état hygrométrique de la colonne atmosphérique traversée.

« Aucune bande de l'oxygène ne s'est montrée dans le spectre visible. Cependant, l'épaisseur de la couche d'oxygène traversée était équivalente à une colonne de plus de 260 *m* d'oxygène à 6 atm. de pression, c'est-à-dire à la pression pour laquelle le tube de notre laboratoire les montre avec une longueur de 60 *m* seulement, ou quatre fois plus petite. Ceci montre bien que pour l'oxygène les raies obéissent à une toute autre loi que les bandes.

« En effet, tandis que pour les raies l'expérience de dimanche dernier nous montre qu'il paraît indifférent d'employer une colonne de gaz à densité constante ou une colonne équivalente en poids, mais à densité variable; pour les bandes, au contraire, l'absorption ayant lieu suivant le carré de la densité, le calcul montre qu'il faudrait, à la surface du sol, une épaisseur atmosphérique de plus de 50 *km* pour les produire.

« Je ne considère l'expérience de dimanche dernier que comme apportant un fait de plus à un ensemble d'études, fait qui demande à être précisé et développé.

« Mais il est certain, pour moi, que la hauteur à laquelle la Tour du Champ de Mars permet de placer le foyer lumineux et la puissance de ce foyer nous promettent des expériences de l'ordre de celles qui viennent d'être faites et du plus haut intérêt. »

Sur la présence de l'oxygène dans le soleil

NOTE ADDITIONNELLE ET EXPLICATIVE DE LA NOTE PRÉCÉDENTE, par M. J. JANSSEN.

Depuis l'admirable application de l'analyse spectrale à l'astronomie, on sait que le soleil contient la plupart de nos métaux usuels terrestres, et tout indique qu'il est le grand réservoir où tous les corps qui composent notre système planétaire se trouvent réunis.

Cependant on n'y a pas constaté la présence d'un corps d'une immense importance pour la production et l'entretien de la vie à la surface de notre terre, à savoir : l'oxygène.

M. Draper avait cru pouvoir annoncer la présence de l'oxygène dans le soleil d'après certaines expériences; mais cette conclusion a été reconnue inexacte.

Or, les raies de l'oxygène se montrent dans le spectre solaire et elles y forment des groupes importants nommés A, B, α (2).

Ces groupes sont-ils uniquement dus à l'action de l'oxygène contenu dans notre atmosphère que les rayons solaires doivent nécessairement traverser, ou bien préexistent-t-ils déjà dans le spectre solaire qu'on obtiendrait avant l'entrée de la lumière solaire dans l'atmosphère terrestre, et celle-ci ne fait-elle qu'en augmenter l'intensité?

Telle est la question à résoudre, si on veut pouvoir affirmer que l'oxygène, au moins tel que nous le connaissons dans nos laboratoires et dans l'atmosphère terrestre, existe ou n'existe pas dans l'atmosphère solaire.

Or, comme nous ne pouvons porter nos instruments aux limites de l'atmosphère, nous sommes obligés d'employer la méthode qui consiste à montrer que la diminution de l'intensité des groupes oxygénés du spectre solaire est en rapport avec l'épaisseur atmosphérique traversée (comme cela peut-être réalisé par l'emploi d'une haute station, le Mont-Blanc par exemple, ou bien encore en montrant que si on fait traverser à un faisceau lumineux, une épaisseur atmosphérique égale ou équivalente à celle que les rayons solaires traversent à une époque déterminée de l'année, en juin, par exemple, et à midi, les groupes obtenus

---

(1) Les groupes A et B sont dus à l'absorption par l'oxygène de l'air. (Note de l'auteur.)

(2) On sait que ces groupes de raies appartiennent bien au gaz oxygène parce qu'on les obtient en faisant passer un faisceau lumineux à travers un tube suffisamment long ne contenant que de l'oxygène pur.

ainsi artificiellement sont égaux en intensité à ceux du spectre solaire dans les conditions précitées.

C'est précisément cette dernière condition qu'on put réaliser en analysant à l'Observatoire de Meudon un faisceau lumineux produit au sommet de la Tour Eiffel, car la distance entre ces deux points est très approchée de celle qui représente une épaisseur atmosphérique équivalente comme quantité à celle de l'atmosphère terrestre, c'est-à-dire qu'un rayon vertical traversant l'atmosphère terrestre doit y éprouver une absorption équivalente à celle du même rayon allant de la Tour à Meudon, en admettant bien entendu que l'absorption est proportionnelle à la quantité pondérale d'air traversée, ce dont on s'est assuré, d'ailleurs, à l'égard du groupe de lignes A. B, α. Voilà ce qui donne un intérêt tout particulier à l'expérience faite en 1889 entre la Tour et l'observatoire de Meudon (1), expérience qu'il serait très intéressant de reprendre dans des conditions d'exactitude plus rigoureuses et plus concluantes.

IX. — Étude de l'absorption atmosphérique des radiations visibles par l'observation spectrale des faisceaux électriques de la Tour Eiffel en 1889.

Par M. A. Cornu.

Il était naturel de penser que, dans une direction horizontale, l'atmosphère terrestre absorbait les mêmes radiations et produisait les mêmes raies spectrales, dites *telluriques*, qu'on observe dans le spectre solaire. L'existence de plusieurs groupes telluriques dans le spectre d'un faisceau électrique projeté de la Tour Eiffel sur l'Observatoire de Meudon a été, en effet, signalée par M. Janssen (*Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CVIII, p. 1035) et présentée comme une démonstration de l'origine terrestre des groupes A et B, ainsi que de quelques bandes dues à la vapeur d'eau.

Je me suis proposé de relever minutieusement, sous une forte dispersion, la série des raies sombres observables dans le spectre des faisceaux électriques émis du haut de la Tour, et de les comparer avec celles figurées dans les cartes spectrales que j'avais publiées antérieurement (2). C'était, en outre, une vérification directe et précieuse de la méthode du *balancement des raies* qui m'avait conduit à distinguer individuellement les raies d'origine solaire et celles d'origine terrestre, dans les groupes de raies les plus compliqués du spectre solaire.

L'étude a été entreprise à l'École polytechnique, dans le local et avec les appareils qui m'avaient servi aux recherches de spectroscopie solaire. Cette étude, commencée le 24 octobre 1889, en utilisant, d'abord simplement, la lumière du phare à éclats du sommet de la Tour, fut poursuivie avec le faisceau d'un des projecteurs de 90 *cm* de MM. Sautter et Lemonnier, que M. Eiffel eut l'amabilité de faire diriger de 8 heures à 10 heures sur l'École polytechnique du 27 octobre au 6 novembre, jour de la clôture de l'Exposition universelle de 1889 et de l'extinction des projecteurs. La distance de la Tour à l'École, relevée sur un plan de Paris au $\frac{1}{12.500}$, est d'environ 4.350 *m*.

L agent chargé du projecteur reconnaissait immédiatement le point de l'horizon vers lequel il devait diriger et maintenir le faisceau. A cet effet, j'avais disposé, à demeure, près de la fenêtre de la mansarde du Pavillon des Élèves où étaient installés mes appareils, une grande lentille de 24 *cm* de diamètre et de 45 *cm* de distance focale : elle avait été réglée, de jour, par la condition d'amener l'image focale de la galerie supérieure de la Tour dans le plan moyen de la flamme d'une lampe modérateur qu'on allumait au crépuscule, ce qui permettait de vérifier le réglage.

La réciprocité des foyers conjugués de la lentille assurait l'envoi d'un faisceau de lumière qui couvrait toute la galerie où les projecteurs étaient en batterie : l'agent préposé à leur manœuvre apercevait dans la direction demandée un disque extrêmement brillant, impossible à confondre avec les points scintillants de l'horizon. Un verre rouge interposé près de la flamme rendait la distinction encore plus facile.

J'ai employé, suivant les circonstances, quatre spectroscopes de dispersion croissante :

---

(1) Grâce à l'offre très aimable qui nous a été faite alors par M. Eiffel et qu'il veut bien renouveler pour cette année.

(2) *Sur les raies telluriques qu'on observe dans le spectre solaire au voisinage des raies D* (*Journal de l'École polytechnique*, LIII[e] cahier, p. 175-212, 1883). — *Étude des bandes telluriques α, B et A du spectre solaire* (*Annales de chimie et de physique*, 6[e] série, t. VII, p. 5-102, 1886).

1° Un spectroscope à vision directe de Duboscq avec échelle latérale;

2° Un goniomètre Brunner, muni de deux prismes de quartz et d'objectifs quartz-fluorine de 50 *cm* de distance focale pour la photographie des spectres;

3° Le même goniomètre muni d'un prisme de Flint et d'objectifs Crown et Flint de 45 *cm* de distance focale;

4° Enfin un grand réseau plan de Rowland observé avec un collimateur de 1 *m* et une lunette de 1,40 *m*.

La fente du collimateur était éclairée par l'image du projecteur de la Tour concentrée par un objectif astronomique de 16 *cm* de diamètre et de 2,30 *m* de distance focale.

Les résultats répondirent entièrement à mon attente : pendant les soirées favorables, je pus faire une étude complète des groupes telluriques A *a* B et D, d'abord avec une dispersion moyenne : mais ce qui

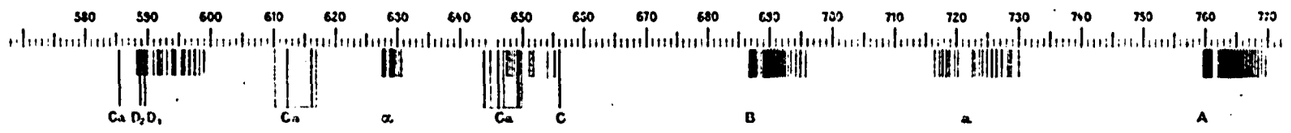


Fig. 231.

m'importait surtout, c'était de pouvoir utiliser la grande dispersion du spectre de deuxième ordre du Réseau Rowland; j'y suis parvenu plusieurs fois, ainsi que le témoigne le résumé donné plus loin des résultats obtenus dans chaque soirée.

J'aurais désiré relever au micromètre toutes les raies sombres visibles avec cette grande dispersion : malheureusement le ciel s'embruma progressivement : la pluie et le brouillard augmentèrent de plus en plus. Je ne pus donc réaliser qu'imparfaitement cette partie de mon programme, les pointés devenant chaque jour plus difficiles et plus pénibles, faute d'intensité lumineuse.

Par bonheur, ce long travail est devenu en grande partie inutile, grâce à la configuration caractéristique des groupes qui reproduisaient exactement ceux de mes cartes, de sorte qu'un petit nombre de pointés ont suffi pour assurer leur identification complète : c'était, en définitive, le but que je m'étais proposé.

Résumé des résultats obtenus.

J'extrais du carnet d'observations les principaux résultats de chaque soirée.

24, 25 et 26 octobre 1889. — Premiers essais avec le spectroscope Duboscq à vision directe : une petite lentille collectrice, puis l'objectif de 16 *cm* projettent l'image linéaire du Phare de la Tour sur la fente.

Reconnu et relevé diverses raies brillantes des vapeurs métalliques de l'arc électrique (sodium, calcium, magnésium), ainsi que plusieurs raies sombres, sur le spectre continu des charbons dans la région rouge du spectre.

La comparaison de ces relevés avec ceux effectués dans la journée du 27, avec la lumière solaire, montre que les raies sombres représentent A *a* et B. (A et B sont dues à l'absorption par l'oxygène de l'air; *a* par la vapeur d'eau.)

27 octobre. — Reçu le faisceau du projecteur de 90 *cm*. Éclat admirable. — On lit facilement un journal à la lumière venue du projecteur. — Spectre brillant. — Lentille collectrice de 50 *cm* de foyer. — Observé beaucoup de détails sur A, *a* B sur les raies aqueuses, près de C et de D, laquelle est double et renversée. — Improvisé un essai avec le réseau Rowland. — Aperçu les cannelures de B.

29 octobre. — Goniomètre Brunner. — Prisme de Flint (60°). — Objectif de 16 *cm* pour concentrer l'image du projecteur sur la fente. — Relevé, sur le cercle divisé, les principales raies dans les groupes A, *a*, B et quelques raies aqueuses voisines de D; en outre, plusieurs lignes brillantes du calcium.

L'éclat du faisceau devient assez grand pour utiliser le spectroscope Rowland. Les deux raies D (vapeur de sodium) sont magnifiques même au 2^me^ spectre : elles sont renversées au milieu de leur longueur, et brillantes aux extrémités. — Dans leur voisinage, toutes les raies aqueuses de ma carte s'y trouvent (les lignes métalliques *solaires* seules, naturellement, font défaut) : je les suis une à une dans le 1^er^ spectre.

Je puis suivre de même en détail la structure du groupe B jusqu'au 8^me^ doublet; au delà, l'intensité lumineuse est trop faible.

J'avais d'abord songé à relever toutes ces raies au micromètre; mais leur disposition m'est si connue et la concordance avec ma carte si parfaite, que je ne crois pas utile de perdre du temps et de me fatiguer la vue à faire ces pointés.

Le groupe α (dû à l'oxygène) est faible; il est surtout altéré dans son aspect ordinaire par l'intensité des raies aqueuses qu'il contient : toutefois, il est reconnaissable; je puis suivre aussi les groupes de raies aqueuses situées entre B et C, que j'ai marquées comme telles sur l'Atlas de Fievez.

30 octobre. — L'éclat du projecteur est très vif. — Le groupe B est admirable dans le 2^me^ spectre. — Je vois au moins jusqu'au 11^me^ doublet et les raies aqueuses qui suivent, en particulier la raie très forte λ=595,58. — Vérification des raies aqueuses, près de C. — Passé toute la soirée à préciser l'identification du groupe α, très faible et altéré par la prédominance des raies aqueuses. — En partant, je laisse le fil du micromètre sur l'une des raies caractéristiques de α : le lendemain, à 2^h^50 de l'après-midi, je constate, avec le soleil, que c'est bien la raie λ=627,68 de α.

Pendant toute la soirée du 30 octobre, l'intensité de la lumière était si grande, que, sans m'en apercevoir, j'ai observé constamment, dans le 2^me^ spectre. La dispersion était si nette que dans le groupe voisin de D j'ai dédoublé la raie aqueuse λ=592,26.

31 octobre. — Le ciel s'éclaircit : l'air se refroidit et s'embrume, l'éclat est moins vif qu'hier. — On pousse l'amabilité jusqu'à m'envoyer simultanément les faisceaux des deux projecteurs : mais je n'en puis utiliser qu'un seul, leur écart angulaire étant trop grand. — Les raies aqueuses sont beaucoup moins marquées : les deux raies D en sont presque dépouillées. — En revanche, le groupe α devient beaucoup mieux reconnaissable. — Le groupe B est très peu visible aussi bien au 1^er^ qu'au 2^me^ spectre. — Malgré la brume qui augmente, les raies violettes HK sont visibles, et même la bande ultra-violette du carbone avec le goniomètre Brunner. — La fumée de l'usine électrique de la place du Panthéon gêne beaucoup.

2 novembre. — Belle soirée. — Addition d'un tube de Geissler à l'hydrogène, pour produire la raie C comme repère dans le champ du spectroscope Rowland. — Vérification des groupes aqueux dans le voisinage de C, par comparaison avec cette raie et les raies brillantes du calcium.

Très bien vu le groupe α : l'éclat du champ est assez vif pour montrer jusqu'au 4^me^ doublet de α et permettre d'effectuer des pointés. — Mesuré la distance de la forte raie λ=627,68 (oxygène) et de la raie aqueuse λ=629,14 située au milieu du 2^me^ doublet de α; deux mesures ont donné 3^t^10 et 3^t^11 au micromètre à fil : le 4 novembre, la même mesure, effectuée avec la lumière solaire, a donné 3^t^105 : l'identification est donc parfaite.

Le groupe aqueux de D est admirable; c'est exactement ma carte : je dédouble 592,26.

3 novembre. — Soirée pluvieuse : néanmoins la lumière est assez vive. — Essai de photographie de la partie réfrangible du spectre. — Goniomètre Brunner. — Lentille collectrice en quartz fluorine. — Double prisme de quartz au minimum de déviation sur la raie violette 423 du calcium. — Obtenu 10 spectres violets et ultra-

violets sur 4 plaques à la gélatine. — Poses variant de cinq secondes à deux minutes. — Aucune bande tellurique. — On ne voit que le spectre continu des charbons, les deux bandes cannelées brillantes du carbone, les raies brillantes H et K du calcium, H'K' de l'aluminium et quelques autres. — Contrairement à ce qu'on aurait pu croire d'après l'état météorologique, le spectre ultra-violet est assez étendu et ne paraît limité à la longueur d'onde $\lambda = 329$ que par l'absorption des glaces fermant l'ouverture du projecteur et du défaut de réflexion ultra-violette du miroir concave en verre argenté.

4 novembre. — Un peu de brume et de fumée de l'usine du Panthéon. — Les raies aqueuses voisines de D sont redevenues bien visibles. — Pointés micrométriques d'identification. — Vérifié l'existence de la raie aqueuse $\lambda = 588{,}27$ qui double presque une raie du fer sur ma carte et que le *balancement* de cette dernière découvre nettement. — Bien vu le groupe α, mais rien de plus que précédemment. — Le groupe B est très beau, en ouvrant la fente. — Aperçu la raie aqueuse $\lambda = 692{,}57$ entre le 10^{me} et 11^{me} doublet et celles qui empâtent le 11^{me}, à savoir $\lambda = 692{,}81$; 692,83; 692,89.

5 novembre. — Pluie toute la journée : brouillard le soir; le faisceau présente une couleur très jaune. Néanmoins la région rouge du spectre est assez brillante pour que j'aie pu faire une assez longue série de pointés entre B et C.

Les 34 pointés micrométriques ont été réduits en longueurs d'onde en prenant comme repères la raie C ($\lambda = 646{,}18$) empruntée au tube de Geissler et une raie brillante du calcium (643,81) ; six autres raies brillantes du calcium ont été identifiées avec des raies métalliques solaires et les autres raies sombres avec celles que j'avais marquées comme telluriques sur la planche de l'Atlas de Fievez et sur une carte inédite que j'ai construite autrefois avec le concours de M. Obrecht.

6 novembre. — Soirée brumeuse. — Lumière pâle et jaune. — Raies aqueuses très effacées. — Elles l'étaient déjà à 2 heures de l'après-midi. — Aucune observation utile.

Après la clôture de ces soirées d'observations, j'ai demandé au Bureau central météorologique les données recueillies au sommet de la Tour se rapportant à l'état de l'atmosphère du 28 octobre au 6 novembre.

Voici les chiffres qui m'ont été transmis :

Date.		Température.	Tension de vapeur.	Vent. Direction.	Vent. Vitesse.
		°	*mm*		*m*
1889. Octobre	28	11,0	7,1	SSO	7,8
—	29	9,8	7,4	SSO	10,3
—	30	10,5	7,3	SSO	12,3
—	31	7,0	4,9	ONO	1,8
Novembre	1	7,1	6,1	ONO	7,0
	2	7,0	5,5	O	9,3
	3	9,0	8,6	SO	20,0
	4	8,9	7,7	SO	(?)
	5	6,6	5,6	NNE	9,8
	6	7,2	5,9	NNE	7,7

Les variations de température et d'humidité sont trop faibles pour intervenir utilement dans la discussion de la visibilité des raies spectrales : la direction et l'intensité du vent paraissent avoir exercé plus d'influence.

En résumé, les raies aqueuses ont été tantôt plus visibles, tantôt moins visibles que celles de l'atmosphère sèche (bandes A, B, α) : la variation de l'humidité de l'air et la direction du vent expliquent naturellement cet effet.

Les raies de l'atmosphère sèche ont toujours été moins marquées que dans le spectre solaire : cela tient à la faible distance (4.350 *m*) parcourue par le faisceau lumineux comparée à celle que parcourt le faisceau solaire, l'astre étant même supposé au zénith. Il est, en effet, facile de montrer que la masse absorbante des 4.350 *m* n'est guère plus de moitié de celle contenue dans une colonne verticale de même base s'élevant verticalement jusqu'aux confins de l'atmosphère. Le poids de l'atmosphère sur un mètre carré est, comme on sait, égal au poids d'une masse de mercure de même base ayant 76 *cm* de hauteur, c'est-à-dire $0{,}76 \times 13.596\ kg = 10.333\ kg$. Le mètre cube d'air à la surface du globe pesant 1,293 *kg*, la hauteur verticale d'une colonne d'air de densité uniforme serait de $\frac{10.333}{1{,}293} = 7.991\ m$.

La colonne horizontale de 4.350 *m* ayant même base, contient donc une masse d'air plus petite dans le rapport de 4.350 à 7.991, c'est-à-dire de 1 à 0,544, rapport un peu plus grand que $\frac{1}{2}$. Il n'est donc pas étonnant de voir les raies des bandes A, B, α relativement moins sombres que dans les observations solaires où l'astre est voisin du zénith, et, à plus forte raison, voisin de l'horizon.

CONCLUSION

Il résulte des observations spectrales résumées ci-dessus, que près de deux cents raies sombres, produites par l'absorption atmosphérique des radiations d'une source de lumière terrestre ont été identifiées individuellement avec les raies dites *telluriques* observées dans le spectre solaire. L'origine atmosphérique de ces raies est donc surabondamment vérifiée.

CHAPITRE IV

EFFETS PHYSIOLOGIQUES DE L'ASCENSION A LA TOUR EIFFEL

Modifications dans l'activité des échanges respiratoires de l'organisme

TRAVAIL MÉCANIQUE DANS LA MONTÉE A PIED

Par le Dr A. HÉNOCQUE

Directeur adjoint du Laboratoire de Physique biologique de l'École des Hautes Études au Collège de France.

Introduction.

Lorsqu'on monte par les ascenseurs à la terrasse de la 3e plate-forme de la Tour (278 *m*), l'organisme est influencé par les différences de l'altitude, de la température, de la ventilation; mais, quelle que soit la variation de ces conditions, les ingénieurs, les employés, les visiteurs, tous ceux qui sont transportés en ascenseur au-dessus de la 3e plate-forme, là où sont situés les laboratoires, ont constaté qu'ils éprouvaient une impression en général analogue. La respiration devient plus ample et plus facile ; le pouls bat plus rapide, puis devient plus régulier et plus résistant. En même temps, ils ressentent un sentiment de bien-être, d'activité générale, d'excitation. La satisfaction d'un isolement sur un plateau où se développe un aussi vaste horizon, et où règne un air d'une grande pureté et particulièrement vivifiant, détermine, principalement chez les femmes, une excitation psychique se traduisant par la gaieté, des conversations animées, joyeuses, le rire, l'attrait irrésistible à monter plus haut encore, jusqu'au drapeau, en somme une excitation générale qui rappelle aux voyageurs celle que provoquaient chez eux des ascensions dans les stations de hautes montagnes. Pour peu que le séjour au sommet se prolonge, cette impression s'accentue. Il se produit une sensation d'appétit remarquable; en même temps, l'esprit étant occupé par ce splendide spectacle, la notion de la durée du séjour s'affaiblit singulièrement, alors s'augmente le désir de prolonger le repos et cette contemplation.

Ces effets, dûs à un transport rapide et sans fatigue dans une couche atmosphérique située à 300 *m* au-dessus du sol dont elle est complètement isolée, méritaient d'être étudiés avec soin. J'ai fait, dans ce but, de nombreuses observations qui m'ont fourni des résultats intéressants que l'on ne pouvait soupçonner *à priori*. J'exposerai ici la partie la plus importante de ces recherches en étudiant successivement les principaux phénomènes de modification dans la circulation et la respiration. J'examinerai surtout les modifications produites dans un des phénomènes physiologiques qui les résume toutes, l'activité de réduction de l'oxyhémoglobine, c'est-à-dire l'activité des échanges respiratoires entre le sang et les éléments des tissus. Les résultats obtenus par cet examen spécial sont beaucoup plus concordants et plus démonstratifs que les constatations de la fréquence du pouls et de la respiration.

§ 1. — Travail mécanique dû à l'ascension à pied.

En étudiant les phénomènes relatifs à l'activité de la réduction après une montée à pied par les escaliers, j'ai eu l'occasion de faire des observations, qui ne sont pas sans intérêt, sur les conditions dans lesquelles s'effectue cette montée et sur le travail mécanique qui y est développé.

Je ferai remarquer que la Tour, par le développement exceptionnel d'un escalier presque continu, se prête particulièrement bien à des recherches de ce genre.

C'est le résultat de celles-ci qui est indiqué ci-après.

A. — *Travail mécanique dû à la montée.*

La montée à pied à la 3ᵉ plate-forme de la Tour comprend une ascension verticale de 277 *m*, et un parcours horizontal sur les escaliers et les plates-formes de 438 *m*, suivant le tableau ci-dessous.

Tableau des données relatives à la montée à pied.

DÉSIGNATION.	ALTITUDE DES ÉTAGES.	HAUTEUR DES ÉTAGES AU-DESSUS DU SOL DES PILES.	NOMBRE DE MARCHES		PARCOURS HORIZONTAL	
			PAR ÉTAGE.	CUMULÉ.	PAR ÉTAGE.	CUMULÉ.
		m			*m*	*m*
Altitude du pied des escaliers (sol de l'intérieur des piles).....	+ 35,08	»	»	»	»	»
Première plate-forme.....	+ 91,13	56,05	347	347	119	119
Parcours horizontal sur celle-ci.....	»	»	»	»	7	126
Deuxième plate-forme.....	+149,23	114,15	327	674	77	203
Parcours horizontal sur celle-ci.....	»	»	»	»	21	224
Plate-forme intermédiaire.....	+220,43	191,35	456	1.130	102	326
Parcours horizontal sur celle-ci.....	»	»	»	»	12	338
Troisième plate-forme (terrasse).....	+312,21	277,13	455	1.585	100	438
Sommet.....	+334,01	298,93	125	1.710	39	477

Ces chiffres vont nous permettre de calculer, pour un homme d'un poids moyen de 70 *kg*, le travail mécanique qu'il doit développer pour faire l'ascension des divers étages en tenant compte de son déplacement horizontal; nous en déduirons son travail en kilogrammètres par seconde, en faisant intervenir le temps de l'ascension. Ces calculs nous amèneront à une évaluation du chiffre du travail dû à la marche sur un terrain horizontal, dont la valeur, malgré tous les travaux faits à ce sujet, reste encore assez incertaine. Parlons d'abord des faits établis par une suite déjà longue d'observations.

Le temps *normal* de la montée pris par les ouvriers de la Tour, soit pendant la construction, soit pendant l'exploitation, est de :

A la 1re plate-forme.	6 minutes.	
— 2e —	12 —	
— — intermédiaire.	21 —	
— 3e —. (terrasse).	30 —	(1)

Ces diverses durées correspondent les unes et les autres à une vitesse moyenne verticale de *0,154 m*. Mais elles amènent, surtout pour la 3ᵉ plate-forme, de l'essoufflement et de la fatigue ; *un tel travail ne pourrait se prolonger*. Aussi trouvons-nous tout à fait exagéré le chiffre de 0,15 *m* que l'on trouve dans la plupart des ouvrages traitant du travail mécanique que l'homme peut produire, comme la moyenne d'une vitesse pouvant être maintenue pendant 8 heures (Courtois, *Moteurs animés*, et autres). La fatigue est déjà bien moindre avec la durée habituelle de 45 minutes prise par des hommes moins exercés. Néanmoins, le personnel de la Tour estime qu'on ne pourrait, même normalement, maintenir cette durée pendant un travail journalier de 8 heures, et il pense généralement que l'homme, pour ne pas éprouver à la fin de la journée un excès de fatigue, ne pourrait effectuer plus de 8 montées par journée de 8 heures de travail, soit une seule montée par heure. C'est sur ces données d'une expérience prolongée que nous opérerons.

Pour un homme dont le poids moyen est de 70 *kg* y compris vêtements, le travail mécanique total comprend celui dû à l'ascension verticale des 277 *m*, soit, sans aucun conteste, $70 \times 277 = 19.390$ *kgm*, et en plus le travail dû à son déplacement horizontal sur un terrain plat de 438 *m*. Ce travail est bien plus difficile à apprécier que le premier, et demande à être étudié avec quelques développements.

Ce mouvement horizontal ne peut se produire que sous l'influence d'une force horizontale dont le point d'application se déplace à une vitesse déterminée et qui produit un certain travail mécanique en *kgm*, s'ajoutant au premier.

---

(1) Dans les observations que j'ai faites (voir tableau nº 2), cette rapidité d'ascension a été dépassée par M. le Dr François, qui est monté en 24 minutes, et par deux étudiants, MM. Duhamel et Murer, qui sont montés en 25 minutes. Ce sont, à ma connaissance, les durées les plus courtes qui aient été réalisées.

Le célèbre voyageur M. d'Abadie, âgé de 70 ans, a fait lui-même une observation d'ascension aussi rapide qu'il pouvait l'effectuer. Elle a été de 35 minutes. Par contre, la durée de 60 minutes a été réalisée par deux étudiants en médecine qui se proposaient d'éviter la fatigue (observations nos 43 et 44).

En appelant F cette composante horizontale de la marche, c'est-à-dire l'effort horizontal que l'homme doit développer pour entretenir celle-ci sur un terrain plat, le travail total effectué, exprimé en kilogrammètres, est :

$$19.390 + F \times 438.$$

Pour se rendre compte de la valeur de la composante horizontale de la marche que nous avons appelée F, on peut rechercher une équivalence entre le travail total ci-dessus et celui résultant du déplacement d'un marcheur sur un terrain plat pendant le même temps.

M. Courtois, ingénieur des ponts et chaussées, donne, dans son *Traité des moteurs animés*, la vitesse de 1,60 *m* comme normale moyenne pour un voyageur sans fardeau sur une bonne route plate. Cette vitesse correspond suivant le rythme normal à 70 pas doubles de 1,37 *m* de longueur et à un parcours de 5.760 *m* à l'heure. Elle peut se prolonger pendant huit heures, soit 40 *km* dans une journée.

Nous estimons qu'au point de vue de la dépense d'énergie musculaire, on peut assimiler le travail journalier des 8 ascensions dont nous avons parlé à ce parcours horizontal de 40 *km* pendant le même temps.

Or le travail pendant les 3.600″ de la marche horizontale est de $F \times 1{,}60 \times 3.600$, soit $F \times 5.760$.

Si l'on admet l'équivalence que je viens d'indiquer dans le travail moyen d'une montée et celui d'un parcours horizontal de 5.760 *m*, on aura l'égalité :

$$19.390 + F \times 438 = F \times 5.760$$

d'où :

$$F = \frac{19.390}{5.322} = 3{,}80\ kg\ (1).$$

Avec cette valeur de F, le travail de l'ascension dû au déplacement horizontal sera de $3{,}80 \times 438 = 1.664\ kgm$.

En y ajoutant le travail suivant la verticale, soit 19.390, le travail total de l'ascension sera de $19.390 + 1.664 = 21.054\ kgm$ pendant 3.600″, soit par seconde $\frac{21.054}{3.600} = 5{,}84\ kgm$.

Ce chiffre est très voisin de celui de 6 *kgm* par seconde généralement admis pour la force humaine représentée par l'action de l'homme sur une manivelle, et un peu au-dessus de celui de 7 *kgm*, soit $\frac{1}{10}$ de cheval, qui figure dans la plupart des ouvrages.

On peut observer que les chiffres qui précèdent correspondent par heure à une ascension verticale de 277 *m*, soit à une vitesse de 0,77 *m* par seconde. Ce chiffre est à peu près la moitié de celui de l'auteur déjà cité, M. Courtois, qui le porte à 0,15 *m* pour un travail moyen prolongé. Ce dernier chiffre conduit à des conséquences tout à fait erronées sur le travail de l'homme montant un escalier.

Cette valeur de 0,15 *m* obtenue momentanément par les ouvriers très exercés, qui font l'ascension en une demi-heure, est à peu près un maximum, mais nullement une moyenne.

Avec cette vitesse, le travail des ouvriers est double du précédent, soit 11,68 *kgm* par seconde, ce qui est certainement un travail excessif au delà des forces humaines.

On peut donc dire que le travail de l'ascension par les escaliers est de 6 *kgm* par seconde pour un travail continu et peut être porté à 12 *kgm* environ pour une ascension unique.

D'une manière générale, en désignant le poids de l'homme par P, la hauteur d'ascension par H, la distance horizontale parcourue par D, et le temps en secondes de l'ascension par *t*, on aura l'égalité :

$$P.H + F.D = 1{,}60.F.t.$$

d'où :

$$F = \frac{P.H}{1{,}60\,t - D}$$

et le travail T par seconde sera :

$$T = \frac{1}{t}(P.H + D.F) = \frac{P.H}{t}\left(1 + \frac{D}{1{,}60.t - D}\right)$$

(Obs. 41). Si $P = 68{,}50\ kg$, $t = 1.800$, $H = 277$ et $D = 438$.

On trouve :

$$F = 7{,}8\ kg \text{ et } T = 12{,}5\ kgm.$$

C'est avec cette formule que sont calculées les valeurs inscrites dans la dernière colonne du tableau n° 2.

Le travail suivant la verticale est indiqué, dans l'exemple que nous venons de prendre, par le chiffre de 18.975 *kgm*, et le travail suivant l'horizontale par 3.416, qui sont dans le rapport de 5,50 à 1.

B. — *Travail dans la descente à pied.*

Pour la descente à pied, nous avons, comme pour la montée, consulté le personnel de la Tour pour lequel une expérience prolongée a donné les résultats que nous allons relater.

La descente par les escaliers de la 3ᵉ plate-forme au sol exige une durée normale de 14 à 15 minutes, pour ne pas amener de fatigue spéciale. L'allure de cette descente est, au point de vue des efforts développés, tout à fait comparable à celle de la montée en 45 minutes. Le rapport de la vitesse de la montée à celle de la descente serait ainsi de 1 à 3.

Ce rapport de 1 à 3 se maintient pour les allures vives un peu exceptionnelles ; la descente en effet peut être réalisée dans une durée de 8 minutes seulement, et comparable aux 25 minutes de la montée rapide.

Dans la descente, le travail mécanique est faible et le travail est presque en entier un travail physiologique ; or, celui-ci doit même être assez élevé en raison du rapport de la vitesse de la montée à celle de la descente.

On verra dans un chapitre suivant des exemples des résultats produits par la descente à pied sur l'activité de la réduction (Voir page 308).

Des recherches plus multipliées sur ce point seraient très intéressantes et nous nous proposons de les réaliser prochainement, en faisant faire des montées d'une manière continue pendant toute une journée, les descentes se faisant par les ascenseurs, et en effectuant pendant une autre journée uniquement des descentes, les ascenseurs servant aux montées et pour les repos.

---

(1) En nous reportant au graphique établi par le professeur Marey (Marey et Démeny, *Mesure du travail mécanique effectué dans la locomotion de l'homme et Variations du travail mécanique dépensé dans les diverses allures*, in *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CIII, 1886), nous voyons que le travail mécanique proprement dit dans la marche horizontale, dans les conditions indiquées, à savoir 70 doubles pas par minute, s'élève à 5 *kgm* par double pas. Le travail par seconde est donc de $5 \times \frac{70}{60} = 5{,}83\ kgm$.

La vitesse réalisée à cette allure étant de 1,60 *m*, le travail par seconde est de $F \times 1{,}60$; on a donc $5{,}83 = F \times 1{,}60$, d'où $F = 3{,}65\ kg$.

Ce chiffre est presque identique à celui de 3,80 *kgm* que nous avons déterminé par des observations d'un ordre différent.

Nous ajouterons que nous n'avons pas tenu compte du *travail physiologique*, dû aux oscillations verticales alternatives du centre de gravité, qui, au point de vue du travail mécanique, donnent une somme nulle, l'un de ces travaux étant négatif et l'autre positif. En ajoutant ces deux travaux dus à l'oscillation, que l'on peut physiologiquement considérer comme s'additionnant, on trouverait pour la marche un travail supplémentaire, d'après M. Marey, de 9 *kgm* par pas. Le chiffre analogue n'a pas encore été déterminé, à notre connaissance, spécialement pour la montée d'un escalier.

§ 2. — De l'activité de réduction de l'oxyhémoglobine.

Pour bien comprendre l'importance de cette étude, il est indispensable de rappeler en quelques mots les données sur le rôle de l'oxyhémoglobine, et les transformations qu'elle subit dans l'organisme.

L'hémoglobine est la matière colorante du sang. Cette substance renfermée dans les globules du sang, auxquels elle donne une couleur rouge, renferme tout le fer du sang; elle doit à sa combinaison peu stable avec l'oxygène son rôle d'agent vecteur de l'oxygène dans les tissus. C'est elle qui, se chargeant dans les poumons de l'oxygène de l'air, le transporte à travers le système vasculaire dans le cœur, les artères et les capillaires, distribuant son oxygène aux éléments des tissus. Dans cet échange entre le sang et les éléments organiques, qui représente la respiration interstitielle, les principes constitutifs des tissus s'oxydent aux dépens de l'hémoglobine, qui, leur cédant son oxygène, est elle-même réduite. Cette hémoglobine réduite, qui donne au sang veineux sa coloration foncée, est ramenée aux poumons pour y faire une provision nouvelle de l'oxygène indispensable à la vie. La quantité d'hémoglobine oxygénée ou oxyhémoglobine, à l'état de santé, varie entre 12 et 14 p. 100 du poids du sang; du reste, la richesse de cette humeur en oxyhémoglobine correspond au poids du fer et est proportionnelle, non seulement au nombre des globules, mais aussi à leur volume.

Chez les anémiques, la quantité d'oxyhémoglobine diminue; elle est de 10, 9, 8, 7 p. 100, suivant le degré de l'anémie, mais peut descendre à 4 p. 100 et moins encore dans les cachexies; elle s'élève au contraire à 15 p. 100 dans la pléthore.

L'examen spectroscopique de l'hémoglobine, lorsqu'on étudie du sang pur, non dilué, sous des épaisseurs variables et graduées, dans un hématoscope, démontre plusieurs bandes d'absorption dans le spectre, qui permettent de distinguer l'oxyhémoglobine de l'hémoglobine réduite et de ses divers dérivés. En résumé, le phénomène caractéristique des deux bandes, situées dans les plages jaune et verte nettement délimitées, faciles à définir et à mesurer, sert de base à l'hématospectroscopie.

La quantité d'oxyhémoglobine est mesurée par l'analyse spectroscopique de quelques gouttes de sang placées dans une petite cuve capillaire appelée hématoscope. C'est également au moyen de l'examen spectroscopique du sang circulant dans le pouce que l'on apprécie l'activité de la réduction, c'est-à-dire le temps nécessaire pour que l'oxyhémoglobine se réduise dans les tissus, abandonnant aux éléments cellulaires la quantité d'oxygène qu'elle contient, phénomène qui constitue la respiration interstitielle, phénomène d'échanges gazeux entre le sang et les tissus. L'activité de la réduction dans les conditions physiologiques varie dans certaines limites.

Cette activité est augmentée par les efforts, la marche, les ascensions, les exercices de gymnastique, d'équitation, d'escrime, de bicyclette, à condition de ne pas atteindre la fatigue exagérée et le surmenage qui amènent le ralentissement des échanges.

Elle est diminuée d'une façon permanente dans certaines maladies, telles que les anémies, la chlorose, les cancers, etc. Elle peut être régularisée pour une médication appropriée.

L'appréciation de la quantité d'oxyhémoglobine et de l'activité se fait par la méthode hématoscopique qui porte mon nom (1).

§ 3. — Modifications de l'activité de réduction de l'oxyhémoglobine dans les ascensions à la Tour Eiffel.

J'ai pris plus de 60 observations en les variant de façon à étudier les effets produits : 1° par l'ascension mécanique en ascenseurs ; 2° et par les montées à pied par les escaliers, à diverses hauteurs ; 3° par la descente des escaliers à pied.

A. — *Montées par les ascenseurs.*

Les observations sont au nombre de 28. Les détails en sont réunis sous forme du tableau n° 1.

Comme exemple, nous reproduisons les résultats d'une des ascensions pratiquées le 24 août 1889.

Obs. 3. — Dr Poitou-Duplessy. Quantité d'oxyhémoglobine, 11 p. 100.

	Durée de la réduction.	Activité de réduction.
En bas	90″	0,61
En haut	80″	0,68

Obs. 4. — Dr Maraverv, 36 ans. Quantité d'oxyhémoglobine, 11,5 p. 100.

En bas	73″	0,79
En haut	53″	1,10

Obs. 5. — Père Ba., dominicain, 29 ans. Quantité d'oxyhémoglobine, 14 p. 100.

En bas	60″	1,16
En haut	56″	1,26

Ces observations et toutes celles qui figurent au tableau montrent que chez des individus à quantité d'oxyhémoglobine différente et d'une activité variable, l'augmentation de l'activité est un fait constant.

Une autre observation démontre la persistance de l'augmentation de l'activité pendant deux heures de séjour à 285 *m* et même après la descente.

Obs. 7. — Dr A. H. Quantité d'oxyhémoglobine, 11,50 p. 100. Ascension rapide sans arrêt, par les ascenseurs.

	Durée.	Activité.
En bas (9h20)	70″	0,80
En haut (9h40)	60″	1,00
En haut (10h35)	40″	1,40
En haut (11h00)	40″	1,40
En bas (11h50)	40″	1,40

On voit que l'activité augmente de 0,20, puis de 0,60, et reste très élevée jusqu'après la descente en bas de la Tour.

Le détail de toutes nos observations est donné dans le tableau n° 1 qui comprend les résultats de 28 observations de montées en ascenseur.

---

(1) A. Hénocque. — *L'hématoscopie*, méthode nouvelle d'analyse du sang, basée sur l'emploi du spectroscope (*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. CIII, n° 18, 2 novembre 1886, et t. CVI, 9 janvier et 23 avril 1888).

A. Hénocque. — *Spectroscopie biologique.* — I. Spectroscopie du sang; II. Spectroscopie des organes des tissus et des humeurs; III. Spectroscopie de l'urine et des pigments. *Encyclopédie scientifique des Aide-mémoire*, 3 volumes, Masson et Gauthier-Villars. Paris, 1895 et 1897.

Tableau n° 1.

N°	DATES.	NOMS.	AGE.	POIDS.	POULS.			OXY-HÉMOGLOBINE P. 100.	DURÉE DE RÉDUCTION EN SECONDES.			ACTIVITÉ DE RÉDUCTION.			OBSERVATIONS.
				kg	EN BAS.	EN HAUT.	VARIATION.		EN BAS.	EN HAUT.	VARIATION.	EN BAS.	EN HAUT.	VARIATION.	
1	11 août 1889.....	Dr A. H.....	49	80	104	112	+ 8	11,5	64	39	—25	0,90	1,40	+0,50	La tension vasculaire était en bas 19,5 *cm*, en haut 22,25 *cm*, puis en bas après repos 19 *cm*.
2	—	Dr Segond.....			84	»	»	12	70	45	—25	0,80	1,15	+0,35	La tension vasculaire était en bas 18 *cm*, en haut 20 *cm*, en bas après repos 18 *cm*.
3	24 août 1889.....	Dr Poitou-Duplessy...			90	86	— 4	11	90	80	—10	0,60	0,68	+0,08	
4	—	Dr Maravery.....	36		70	72	+ 2	11,5	73	53	—20	0,79	1,10	+0,49	
5	—	P. B.....	29		90	»	»	14	60	56	— 4	1,16	1,26	+0,10	
6	—	P. D.....	49		72	72	0	14	54	60	+ 6	1,24	1,16	—0,08	Résultat exceptionnel, mesures prises au sommet.
7	6 septembre 1889.	Dr A. H.....	49	80	90	96	+ 6	12	70	60	—10	0,80	1,00	+0,20	9h40m — Séjour à 277 *m*.
									—	40	—30		1,40	+0,40	10h35m — Séjour à 277 *m*.
									—	40	—30		1,40	+0,40	11h00m — Séjour à 277 *m*.
									40	—	—30		1,40	+0,40	11h50m — Séjour à 277 *m*.
8	27 août 1889.....	Dr A. H.....	49	80	88	96	+ 8	11,5	70	50	—20	0,82	1,15	+0,33	
9	26 mars 1890.....	Dr A. H.....	50		»	»	»	12	55	50	— 5	1,05	1,20	+0,15	
10	26 mai 1890.....	Dr Schlemmer.....	39		68	68	0	12	95	75	—20	0,63	0,80	+0,17	
11	—	Dr Schlemmer.....			64	75	+11	12	50	40	—10	1,20	1,50	+0,30	
12	—	Dr Oliver.....			83	85	+ 2	»	80	55	—25	»	»	»	
13	24 mai 1890.....	Dr Oliver.....			100	98	— 2	»	50	55	+ 5	»	»	»	
14	8 octobre 1893...	Dr A. H.....	53		120	112	— 8	12	60	55	— 5	1,00	1,09	+0,09	
15	Mai 1894.....	Dr A. H.....			100	108	+ 8	12	55	43	— 8	1,09	1,43	+0,34	
16	—	Fischer			80	84	+ 4	»	90	55	—35	»	»	»	
17	—	Dr Don. Labbé.....			80	82	+ 2	12	60	40	—20	1,00	1,40	+0,40	
18	—	Mme L.....			100	88	—12	13,5	95	58	—37	0,90	1,18	+0,28	
19	—	Dr Marcel Labbé.....			84	80	— 4	12	65	53	—12	0,93	1,10	+0,23	
20	—	Dr Tripet.....			84	86	+ 2	12	90	50	—40	0,66	1,20	+0,54	
21	—	Mme T.....			84	86	+ 2	12	80	100	+20	0,75	0,60	—0,15	Résultat exceptionnel.
22	27 mai 1894.....	Dr A. H.....			96	»	»	13	60	50	—10	1,08	1,30	+0,22	
23	—	Dr A. H.....			100	108	+ 8	12	70	30	—40	0,85	2,00	+1,15	
24	13 avril 1895.....	Dr F. Lagrange.....			»	»	»	12,5	60	55		1,00	1,25	+0,25	
25	27 juin 1896.....	Dr Proust.....			84	»	»	13	60	50	—10	1,08	1,60	+0,52	Ces quatre observations 25, 26, 27, 28 ont été prises dans la même séance que les observations de montées à pied n°s 48, 49, 50 du tableau n° 2.
26	—	Dr Deschamps.....	39	84	»	»	»	12	70	60	—10	0,84	1,00	+0,16	
27	—	Lache, étudiant en médecine.	22	80	72	»	»	13	65	55	—10	1,00	1,18	+0,18	
28	—	Carlet, étudiant en médecine.	26					13	52	46	— 6	1,28	1,36	+0,16	

Examinons les conclusions générales qui résultent de l'étude du tableau d'ensemble : 1° sur les 28 cas, l'activité est augmentée 26 fois. Il n'y a que deux cas de diminution de l'activité, et encore est-elle très minime (0,18 à 0,15), et elle doit être attribuée à une influence morale (vertige ou état nerveux). L'augmentation peut donc être considérée comme la règle. Elle varie de 0,08 à 0,54; la moyenne est d'environ 0,28 (elle a atteint exceptionnellement 1,15 dans une observation, n° 23).

B. — *Activité de la réduction dans les montées à pied.*

Comme exemple des phénomènes produits dans la montée à pied, je reproduis trois observations qui ont été prises le 26 juin 1896 à la suite d'une conférence faite à la Tour en présence du professeur Proust et de ses élèves du Cours d'hygiène à la Faculté de médecine, réunis au nombre de 80.

Obs. 48. — M. Bernard, étudiant en médecine, 26 ans. Oxyhémoglobine, 11 p. 100.

	Durée.	Activité.
En bas.....	60″	0,80
En haut.....	50″	1,10

Obs. 49. — M. Duhamel, étudiant en médecine, 27 ans. 11 p. 100 d'oxyhémoglobine.

En bas.....	65″	0,80
En haut.....	50″	1,25

Obs. 50. — M. Murer, étudiant en médecine, 24 ans. 12 p. 100 d'oxyhémoglobine.

En bas.....	80″	0,75
En haut.....	35″	1,09

Dans ces trois observations, nous notons une augmentation de l'activité très importante de 0,20, 0,34 et 0,45, en d'autres termes du quart, du tiers, et plus de la moitié de l'activité prise au départ.

L'étude du tableau n° 2, qui résume 26 observations de montées à pied, permettra d'apprécier les variations qui se sont produites dans les diverses circonstances.

Tableau n° 2.

DATES.	NOMS.	N°s	AGE.	POIDS VÊTU. kg	POULS. BAS.	POULS. HAUT.	POULS. VARIATION.	OXYHÉMOGLOBINE P. 100.	DURÉE DE RÉDUCTION EN SECONDES. BAS.	DURÉE DE RÉDUCTION EN SECONDES. HAUT.	DURÉE DE RÉDUCTION EN SECONDES. VARIATION.	ACTIVITÉ DE RÉDUCTION. BAS.	ACTIVITÉ DE RÉDUCTION. HAUT.	ACTIVITÉ DE RÉDUCTION. VARIATION.	DURÉE DE L'ASCENSION. min.	HAUTEUR ATTEINTE. m	TRAVAIL EN kgm. c.	OBSERVATIONS.
29 janvier 1888...	Gobert	32	53	75	»	»	»	13	67	83	+16	0,95	0,78	—0,17	6	56	14,61	
— ...	Dr Gustave Simon	33	42	70	»	»	»	12	80	75	— 5	0,76	0,80	+0,04	6	56	13,73	
— ...	Dr Hénocque	34	48	72	»	»	»	11,5	68	63	— 5	0,84	0,92	+0,08	6	56	14,11	
7 juillet 1888....	Dumont	35	41	85	»	»	»	13	90	70	—20	0,72	0,92	+0,20	6	56	16,03	
—	Dedieu	36	26	60	»	»	»	12	95	90	— 5	0,60	0,67	+0,07	6	56	11,72	
7 octobre 1888...	G. Eiffel	37	56	75	84	120	+36	13	70	45	—25	0,93	1,40	+0,47	15	114	11,02	
— ...	Dr Hénocque	38	48	72	96	110	+14	11,5	53	55	+ 3	1,08	1,04	—0,04	15	114	10,58	Essoufflement, fatigue.
— ...	V. E.	39	18	52	80	100	+20	13	90	75	—15	0,70	0,85	+0,15	15	114	7,63	
14 avril 1889.....	Dr François	40	28	68	80	92	+12	11	115	70	—45	0,53	0,78	+0,25	24	277	16,11	
—	Dr Reymond	41	24	68,5	114	120	+ 6	11	90	70	—20	0,60	0,80	+0,20	30	277	12,39	
—	Dr Hénocque	42	48	80	88	92	+ 4	11	65	105	+40	0,84	0,53	—0,31	44	277	9,32	
15 mars 1890....	Riche, étudiant en médecine	43	20	71	68	92	+24	12	60	40	—20	1,00	1,50	+0,50	60	277	5,88	
21 —	B., »	44	20	68	104	100	— 4	14	50	40	—10	1,40	1,75	+0,35	60	277	5,66	
18 mai 1890.....	Dr Schlemmer	45	39	»	68	68	»	12	90	70	—20	0,65	0,85	+0,20	45	277	»	
27 —	B., étudiant en médecine	46	20	68	100	88	—12	14	80	75	— 5	0,87	0,95	+0,15	45	277	7,75	
27 —	Riche, »	47	20	71	88	68	—20	12	64	70	+ 6	0,92	0,80	—0,12	45	277	8,49	
27 juin 1890.....	Bernard, »	48	26	»	»	»	»	11	60	50	—10	0,90	1,10	+0,20	28	277	13,57	Pour un poids approximatif de 70 kg.
—	Duhamel, »	49	27	»	72	84	+12	11	65	50	—15	0,80	1,25	+0,45	25	277	15,74	
—	Murer, »	50	24	»	»	»	»	12	80	55	—35	0,75	1,19	+0,34	25	277	15,74	
25 avril 1890.....	Dr Porge	51	28	63	72	116	+44	12	41	30	—11	1,45	2,00	+0,55	»	114	»	
—	G. Videau	52	29	63	74	112	+38	12,5	65	53	—12	0,95	1,15	+0,20	»	114	»	
12 novembre 1899.	R. Pinsan	53	26	61,5	80	116	+36	12,5	47	32	—15	1,25	1,85	+0,60	15	114	9,03	
— .	Dr Porge	54	31	63	68	144	+76	12	95	115	+20	0,63	0,50	—0,13	15	114	9,26	Essoufflement, fatigue.

En examinant ce tableau au point de vue de l'activité de la réduction, nous trouvons que celle-ci n'a été diminuée que dans 4 cas sur 23. Elle a été au contraire augmentée dans tous les autres (19 cas). L'augmentation de l'activité est donc la règle. La diminution ne s'est produite que dans des cas d'essoufflement, c'est-à-dire de surmenage dû à l'effort trop rapide ou trop intense, ce qui s'observe d'ailleurs dans tous les exercices physiques exagérés.

L'augmentation de l'activité est à peu près la même que pour la montée en ascenseurs, quoique ayant une tendance à être supérieure. Elle varie de 0,04 à 0,60; elle est en moyenne de 0,29.

Le minimum de 0,04 coïncide avec un certain degré d'essoufflement. Les deux maxima 0,55 et 0,60 ont coïncidé avec une ingestion préalable de café concentré.

Il semble donc qu'une conclusion s'impose: dans l'ascension passive, l'augmentation est certainement due à l'influence du changement rapide du milieu, tandis que dans l'ascension active, le travail produit et l'exercice musculaire donnent bien une augmentation, mais celle-ci n'est pas aussi prononcée qu'on pouvait le supposer.

L'influence du milieu ambiant semble à elle seule avoir une importance à peu près égale à celle de la dépense d'énergie musculaire, combinée avec celle du milieu. Ces deux influences n'agissent pas nécessairement dans le même sens, ainsi que le prouvent les quelques cas où la diminution a été observée.

C'est une des raisons pour lesquelles il ne nous a pas été possible de trouver une relation entre le travail mécanique produit par la montée à pied et l'augmentation de l'activité. Ces études demanderaient à être poursuivies et faites sur un beaucoup plus grand nombre d'individus, et dans des conditions encore plus précises.

C. — *Descentes à pied.*

Il nous a été possible dans quelques observations de constater des modifications de l'activité de la réduction dans la descente à pied. Voici le tableau résumé de ces observations :

N° 45, 26 mars. — Dr Schlemmer, ascension (3me étage) en 15', descente en 25'.

	Pouls.	Durée.	Modification de l'activité.
En haut	68	95"	+0,17, par la montée.
En bas	76	56"	+0,25, par la descente.

N° 46, 27 mars. — Bessaude, ascension en 15', descente en 25'.

En haut	100	80"	+0,15, par la montée.
En bas	84	50"	+0,43, par la descente.

N° 47, 27 mai. — Riche, ascension en 15', descente en 25'.

En haut	88	64"	—0,12, par la montée.
En bas	68	58"	+0,24, par la descente.

Dans une autre observation (n° 14), la descente a été de 20 minutes sans amener d'essoufflement et sans accélération notable.

Dans deux autres cas d'ascension au 2ᵉ étage (nᵒˢ 51 et 53), la descente s'est effectuée en 5 minutes, sans essoufflement, mais avec sensation de fatigue principalement dans les muscles des mollets et le droit antérieur de la cuisse. (L'ascension avait duré un quart d'heure.)

En examinant ce tableau, nous constatons que dans les trois premières observations, où la montée préalable avait duré 45 minutes, la descente n'a duré que 25 minutes. L'allure, d'ailleurs, n'avait pas été réglée d'avance ; mais dans les trois cas il y a augmentation de l'activité de la réduction supérieure même à l'augmentation produite par la montée, soit 0,25+0,42. Bien plus, dans le troisième cas, la montée ayant produit de la fatigue et de l'essoufflement, l'activité était, au sommet de la Tour, diminuée de 0,12. Au contraire, après la descente, l'activité était augmentée de 0,24.

Dans les deux dernières observations, la descente s'est effectuée en 5 minutes, tandis que la montée avait demandé 15 minutes.

Ces résultats semblent donc amener à cette conclusion, du moins pour ce petit nombre d'observations, que la fatigue due au travail physiologique de la descente, fatigue qui a surtout pour siège les extenseurs du pied et de la jambe, c'est-à-dire la région du mollet et la partie supérieure de la cuisse, a pour conséquence une augmentation de l'activité de la réduction supérieure à celle que produisait la montée et s'ajoutant même à celle-ci.

Ces conclusions seraient d'ailleurs en accord avec les observations faites dans la pratique journalière des travaux à la Tour, telles que nous les avons exposées d'autre part.

§ 4. — Modification du pouls.

a. *Montées par les ascenseurs.*

Les variations du pouls ne présentent pas la constance de l'augmentation observée pour l'activité de la réduction. La diminution a été observée dans 6 cas sur 17 observations.

L'augmentation paraît au contraire beaucoup plus habituelle. En effet, dans 11 cas sur 17, ces augmentations ont été de 2 à 8 et très exceptionnellement de 11

b. *Montées à pied.*

Au contraire, dans les montées à pied, la diminution n'a été observée que 2 fois chez le même individu, malgré une augmentation de l'activité de 0,34 et 0,55 (obs. 13 et 17). L'augmentation se montre dans les 14 cas qui suivent, variant de 1 à 76.

Pouls.	Activité.	Pouls.	Activité
+ 1 un cas.....	+0,20	+24 un cas.....	+0,50
+ 4 un cas.....	—	+36 deux cas.....	+0,60 / +0,47
+ 5 un cas.....	—	+38 un cas.....	0,20
+ 6 un cas.....	0,20	+44 un cas.....	+0,55
+ 8 un cas.....	+0,17	+76 un cas.....	−0,15
+12 un cas.....	+0,25		
+20 deux cas.....	+0,15		

De l'examen de ce tableau, il résulte qu'il y a généralement concordance entre l'augmentation du pouls et celle de l'activité.

§ 5. — Tension vasculaire.

Dans une première ascension faite en compagnie du Dʳ Potain qui voulait étudier l'action de l'ascension sur le pouls de ses élèves, nous avons obtenu les résultats suivants, sur deux sujets : le Dʳ Segond et le Dʳ H.

La tension y est exprimée en centimètres de mercure.

Obs. 1. — Dʳ H., 11 août 1889. Quantité d'oxyhémoglobine, 11,5 p. 100.

	Pouls.	Tension.	Activité.
En bas.....	114	19,5 *cm*	0,90
En haut.....	104	22,25 *cm*	1,40

Obs. 2. — Dʳ Segond.

En bas.....	84	18 *cm*	0,80
En haut.....	80	20 *cm*	1,15

Dans ces deux cas, l'ascension était passive, faite dans les ascenseurs. Une troisième observation a été prise par le Dʳ Porge dans une montée à pied à la 2ᵉ plate-forme en 15 minutes.

Obs. 53. — M. Pinsan.

	Pouls.	Tension.	Activité de la réduction.
En bas.....	80	15 *cm*	1,25
En haut	116	16 *cm*	1,85

L'on remarque que l'augmentation de la tension a été plus prononcée dans les ascensions passives à 300 *m* que dans la montée à pied.

Dans ces observations, la tension artérielle a été prise à l'aide du sphygmomanomètre et suivant la méthode du professeur Potain, par le professeur lui-même et par le Dʳ Porge.

§ 6. — Modification de la respiration.

Les variations du nombre des respirations sont très irrégulières. Quel que soit le mode d'ascension, l'on observe le plus souvent une faible diminution de 3 ou 4 respirations par minute, mais presque aussi souvent l'égalité. L'augmentation semble être exceptionnelle. Cette absence de résultats accentués peut s'expliquer par la difficulté de l'évaluation précise du nombre des respirations dans un examen rapide et subordonné à l'auto-suggestion du sujet observé.

Cependant, d'une manière générale, la respiration a présenté une augmentation notable dans l'amplitude de l'inspiration.

Conclusions.

Il résulte de toutes ces observations et de leur étude aux différents points de vue que j'ai envisagés, que la caractéristique de l'influence des ascensions à la Tour sans aucun travail, et par conséquent l'action particulièrement due au transport rapide, est l'augmentation très notable et pour ainsi dire constante de l'activité de la réduction.

Cette augmentation se rencontre, il est vrai, dans des ascensions en funiculaire, sur des montagnes

élevées ; mais elle se produit ici non plus à un millier de mètres et davantage, mais bien à la simple hauteur de 300 *m*.

Dans les observations d'ascension en funiculaire à Glyon (742 *m*), à Murren (1.630 *m*), au Righi Kulm (1.800 *m*), j'ai observé des différences s'élevant à peine à 0,10, c'est-à-dire inférieures aux augmentations moyennes observées à la Tour. Il faut donc admettre une action spéciale en rapport avec la position de la Tour isolée de la couche atmosphérique en contact avec la terre. Au sommet de la Tour, on serait donc dans une sorte de climat comparable à celui de montagnes beaucoup plus élevées ; et d'ailleurs, les observations météorologiques démontrent bien pour les variations de l'aération, de la température, de la radiation et du régime des vents, ainsi que pour la tension électrique de l'atmosphère, une analogie semblable avec les variations observées sur des montagnes très élevées. Cela résulte des travaux de même ordre, précédemment rapportés dans ce livre.

Il est permis d'en tirer une conclusion au point de vue thérapeutique : c'est que l'influence de l'ascension est favorable dans tous les états morbides où il y a indication d'exciter l'activité de la réduction, par exemple, en premier lieu, dans les anémies, la chlorose, certaines dyspepsies, etc.

Cette opinion, exprimée par plusieurs médecins, qu'on pourrait utiliser le séjour de la 3ᵉ plate-forme dans un but thérapeutique, c'est-à-dire d'y installer une sorte de cure d'altitude, était raisonnable. En effet, on a remarqué dans le personnel, et en particulier chez les femmes employées aux établissements des diverses plates-formes, et même chez des hommes souffrants ou convalescents, une amélioration très sensible de l'état général, en particulier l'augmentation de l'appétit et la régularisation de l'activité générale de la nutrition.

Il serait intéressant de tenir compte de ces résultats dans les cures d'altitude auxquelles on pourrait adjoindre un mode facile d'ascensions rapides et répétées sur des sommets aussi abrupts et isolés que possible, où l'on se trouverait sous l'influence d'une atmosphère tout à fait spéciale et très différente des couches voisines du sol, quelque élevé qu'il soit.

SEPTIÈME PARTIE

LA TOUR PENDANT L'EXPOSITION DE 1889

§ 1. — Pose du drapeau du sommet.

Le dimanche 31 mars 1889, la Tour ayant atteint la hauteur de 300 *m*, on put se disposer à ériger le drapeau national à la dernière plate-forme, et une fête intime donnée aux ouvriers du chantier avait été préparée à cette occasion ; mais la présence du Ministre du Commerce, M. Tirard, celle des Directeurs de l'Exposition, MM. Alphand et G. Berger, celle enfin des Présidents du Conseil municipal, M. Chautemps, du Conseil général, M. Jacques, lui donnèrent une importance qui n'avait pas été prévue. Voici, d'après le journal *le Champ de Mars* (numéro du 6 avril 1889), quelques détails sur cette cérémonie.

Fig. 235. — Pose du drapeau du sommet.

« Les deux cents hommes du chantier avaient été réunis dans l'intérieur du pilier Ouest, où une collation avait été préparée. A une heure et demie, M. Eiffel a pris la tête du défilé des personnes qui par les escaliers devaient faire l'ascension jusqu'au sommet Auprès de M. Eiffel se tenaient M. Georges Berger et son secrétaire, M. Thurneyssen, M. Chautemps et M. Jacques, M. Contamin et M. Pierron, ingénieurs de l'Exposition.

Vers 2 heures et demie, on arriva sur la petite plate-forme du sommet, et M. Eiffel hissa lui-même le drapeau national, mesurant 7,50 *m* de long et 4,50 *m* de large. Une détonation retentit, suivie à courts intervalles de vingt autres.

A la descente, ces messieurs furent reçus par le Ministre, M. Tirard, et par M. Alphand, qui les attendaient dans la pile Ouest.

Avant le lunch, M. Eiffel prit la parole. Il s'adressa aux ouvriers qui s'étaient groupés autour de lui :

« Mes chers amis,

« Je viens d'éprouver une grande satisfaction, celle d'avoir fait flotter notre drapeau national sur le plus haut édifice que l'homme ait jamais construit.

« Nous voici au bout de notre tâche ; mais, pour l'atteindre, que d'efforts ont été faits par nous tous, soit comme intelligence, soit comme travail ! Que de constance il nous a fallu, à moi et à mes collaborateurs immédiats, pour préparer et coordonner le travail, à vous pour l'exécuter au milieu des intempéries, par le froid et le vent que vous avez si souvent bravés sur ce haut sommet ! Mais nous sentions qu'engagés dans cette voie, il n'y avait pas à reculer, et qu'ayant promis de réaliser une œuvre souvent tentée ou rêvée, mais jamais encore exécutée par aucun peuple, nous devions tenir notre parole, sous peine de compromettre une partie de l'honneur national.

« Cette parole, la voilà tenue, grâce à un concours de dévouements auquel je dois rendre un public hommage, et je suis sûr que vous vous y associerez.

« Je citerai tout particulièrement mes fidèles collaborateurs, MM. Nouguier, Kœchlin, Salles et Gobert, votre chef M. Compagnon, dont je n'ai plus à faire l'éloge, et son second M. Milon, dont l'énergie et la prudente habileté nous ont rendu tant de services dans les montages difficiles. Je vous parlerai aussi de notre personnel des ateliers de Levallois, de nos nombreux dessinateurs, dirigés par leur excellent chef M. Pluot, de vos camarades, à la tête desquels se trouvent MM. Letourneau, Pentecôte et Gagnot. C'est grâce à leur soin et à leur habileté que les pièces arrivaient assez bien préparées pour que leur montage pût toujours s'effectuer dans des conditions réellement faciles.

« Je n'oublierai pas non plus M. Sauvestre, notre architecte, qui nous a apporté son excellent concours pour assurer la beauté de notre œuvre.

« Je dis notre œuvre; en effet, c'est bien une œuvre qui nous est commune à tous et dont nous pouvons être fiers d'être les collaborateurs à des degrés divers. Vous y avez tous mis ce quelque chose qui ne se paye pas, ne s'achète pas, ne se vend pas; je veux parler du dévouement à l'œuvre elle-même, sans lequel aucune grande chose n'est possible. C'est ce dont je vous remercie aujourd'hui et dont je conserverai toujours le souvenir. Vous le garderez aussi, j'en suis sûr, car vous avez la fierté de votre travail et vous voyez les témoignages de sympathies qui vous ont été donnés par la présence des éminentes personnalités qui nous entourent.

« Vous vous rappellerez toujours les grands efforts que nous avons faits en commun pour montrer à tous que, soit par ses ingénieurs, soit par ses ouvriers, la France tient encore une grande place dans le monde et que nous sommes toujours capables de réussir là où les autres ont échoué, et cela au grand honneur de la France et de la République. »

La réponse de M. Tirard a été courte, mais des acclamations unanimes l'ont accueillie. Après avoir reconnu que l'œuvre de M. Eiffel — qu'il lui avait coûté d'approuver au début — était le plus extraordinaire témoignage de ce que peut faire un homme entouré de dévoués collaborateurs, il a annoncé à l'auteur de la Tour qu'un décret le nommant Officier de la Légion d'honneur venait d'être soumis à la signature du Président de la République.

« Monsieur Eiffel, et vous, ses collaborateurs, a dit M. Tirard, permettez-moi de vous adresser mes plus chaleureuses félicitations, non seulement au nom du Gouvernement, mais encore au nom de l'univers entier.

« Je suis d'autant plus à l'aise pour vous parler ainsi que j'étais un de ceux qui, à la première heure, n'étaient pas convaincus que la Tour pût s'achever. Je reconnais que je me suis trompé. Je fais amende honorable.

« Il y a dans cette œuvre le témoignage de ce que peut faire l'énergie d'un homme.

« Mais je veux aussi féliciter les braves ouvriers, les modestes collaborateurs de M. Eiffel! Ce sont ces ouvriers qui sont la gloire, la force et l'espérance de la patrie.

« J'espère que les sentiments que je viens d'exprimer seront ratifiés par les visiteurs du monde entier. »

M. Chautemps a ensuite remis, au nom du Conseil municipal, 1.000 francs qui devront être répartis entre les ouvriers du chantier.

Puis un ouvrier mécanicien, M. Rondel, accompagné d'un de ses camarades, ouvrier charpentier, s'exprime en ces termes, après avoir remis un bouquet à M. Eiffel :

« Monsieur Eiffel,

« Je viens au nom de mes camarades et amis, les ouvriers de la Tour de trois cents mètres, vous exprimer toutes nos sympathies et le respect que nous vous devons d'avoir su mener à bonne fin cette grande œuvre. Depuis deux ans, votre nom a retenti dans l'univers entier. L'heure a sonné où l'on pourra venir contempler votre idée grandiose et admirer ce chef-d'œuvre. Recevez ce présent en signe de reconnaissance. Merci pour tous mes amis, encore une fois merci. Puissions-nous redire aux enfants de nos petits-enfants que nous avons travaillé au monument le plus imposant du monde! Merci au Conseil municipal de l'honneur qu'il nous a fait de prêter son concours à l'érection de notre drapeau!

« Vive l'ingénieur Eiffel! vive la France! vive la République! »

Tous les ouvriers poussent les mêmes acclamations. Enfin, M. Alphand clôt la série des discours :

« C'est un travailleur, dit-il, qui parle à des travailleurs. C'est un camarade, qui est avec vous depuis deux ans et qui sait ce que vous avez accompli, qui parle à des camarades.

« Cette Tour fait honneur, non seulement à M. Eiffel, mais encore à vous tous.

« Ce sera plus tard un titre de gloire pour chacun de vous d'avoir travaillé à la Tour, et vous pourrez parler avec orgueil de votre collaboration.

« M. Eiffel est un général; mais un général, pour remporter une victoire, a besoin de bonnes troupes. Si M. Eiffel a vaincu toutes les difficultés, c'est grâce à vous.

« Honneur donc, non seulement à M. Eiffel, mais à vous tous! »

M. Alphand finissait à peine de parler qu'une voix mâle et claire s'est élevée, disant : « Merci pour les ouvriers! »

Ces mots ont soulevé un véritable tonnerre de bravos et d'applaudissements.

Cette série de discours étant terminée, les ouvriers ont pris part à une joyeuse collation avant de quitter le chantier.

§ 2. — Médaille commémorative.

Quelques jours auparavant, le Conseil municipal avait, dans sa séance du 16 mars, adopté une proposition déposée par M. Paul Viguier et par un grand nombre de ses collègues, et tendant à la frappe d'une médaille qui serait distribuée aux personnes ayant pris part à la construction de la Tour.

Fig. 230.

Cette proposition était ainsi conçue :

« Le Conseil,

« Considérant que la ville de Paris est intéressée à honorer ceux qui auront concouru à l'achèvement de la Tour Eiffel,

« Délibère :

« *Article premier.* — Une médaille de grand module portant l'effigie de la Tour de 300 mètres, les armes de la ville, et, en relief, le nom des destinataires, sera frappée aux frais de la Ville et remise, le jour de l'inauguration, à tous les ouvriers qui auront, depuis le 1er mars 1889 jusqu'à l'achèvement des travaux, travaillé personnellement, d'une façon continue et manuellement, au montage et au parachèvement de l'œuvre sur le chantier de l'Exposition universelle.

« *Art. 2.* — Les exemplaires en argent seront exclusivement attribués, savoir :

« 1° Une médaille à M. Eiffel, ingénieur-constructeur de la Tour;

« 2° Une médaille au contremaître du chantier aérien;

« 3° Une médaille à chacun des ouvriers manuels dudit chantier ayant travaillé jusqu'au complet achèvement.

« Le bureau du Conseil est chargé d'arrêter, sur les indications du constructeur, et après contrôle par la Direction générale des travaux de l'Exposition, la liste des ayants droit.

« *Art. 3.* — Des médailles en bronze, à titre de commémoration, pourront être distribuées par les soins du Bureau.

« Signé : Paul Viguier, Jacques, Darlot, Hovelacque, Rouzé, Collin, Cusset, Dubois, Albert Pétrot, Benon, Champoudry, Bassinet, Saint-Martin, Strauss, Hervieux, Chabert, Bompard, Arsène Lopin, Émile Richard, Patenne, Guichard, Paillot, Lavy, Rousselle, Maury, Gaufrès, Gaston Carle, Lyon-Allemand, Deligny, Cattiaux, Joffrin, Gamard, Després, Hattat, Muzet, Navarre, Boué, Levraud, Lerolle, Alphonse Humbert, Boll, Alfred Lamouroux. »

La remise de cette médaille fut faite par M. Alphand aux destinataires dont les noms suivent :

MÉDAILLES EN ARGENT

Ingénieurs et contremaîtres.

MM. Eiffel (Gustave).
Nouguier (Émile).
Kœchlin (Maurice).
Sauvestre (Stephen).

MM. Salles (Adolphe).
Compagnon (Jean).
Milon (Eugène).

Ouvriers.

André (Louis).
Alletru (Marcel).
Balans (Georges).
Baudrand (Louis).
Bauducel (François)
Bories (Auguste).
Boué (Édouard).
Bruyelle (Élysée).
Béchon (Maurice).
Berthet (Jean).
Boissy (Rémy).
Brignon (Antoine).
Beffara (Armand).
Bastien (Eugène).
Baudrand (Antoine).
Calmels (Paul).
Calmels (Hippolyte)
Calvi (Joseph).
Charpentier (Étienne).
Calzia (Antoine).
Coutanceau (Ernest)

Carle (Auguste).
Chassang (Étienne).
Dieuzaide (Pierre).
Démon (Henri).
Daste (Marcel).
Diziain (Joseph).
Dumontel (Auguste)
Dalby (Pierre).
Echaubard (Jean).
Février (Louis).
Gaujarenque (Lippel.)
Guellec (Louis).
Gouet (Louis).
Granjard (Félix).
Gourio (Louis).
Gourdelier (Victor).
Hureaux (Narcisse).
Julia (Léon).
Jaillet (Auguste).
Laugé (Joseph).
Levrat (Louis).

Lamarque (Victor).
Lépine (Jean).
Ladoucc (Charles).
Larivain (Alfred).
Lioret (Gabriel).
Lebayle (Pierre).
Lalande (Maximil.).
Lioret (Alexandre).
Legoubet (Ernest).
Maudet (Léon).
Milhorat (Adrien).
Miramand (Jean).
Menu (Louis).
Moscati (Polycarpe)
Maguin (Hubert).
Marcel (Auguste).
Malochet (François)
Mirasson (Jean).
Marcel (Eugène).
Moyne (Benoit).
Nicolle (Léon).

Nicolle (Eugène).
Nègre (Henri).
Peynard (Jean).
Pallas (Pierre).
Parant (Victor).
Quéleux (Émile).
Rondécl (Louis).
Rochefort (Jean).
Rous (Cyprien).
Roumier (Joseph).
Roche (Cyrgne).
Soret (Joseph).
Sauvat (Antoine).
Scagliotti (Ange).
Téron (Auguste).
Téron (Pierre).
Téron (Basile).
Touzi (Archange).
Thiébaut (Émile).
Vidal (Jean).
Vidal (Louis).
Valette (Jean).

MÉDAILLES DE BRONZE

Ingénieurs et employés.

Anquetin.
Ansaloni.
Adam.
Alalinarde.
Caucé.
Collin (Joseph).

Daydé (Pierre).
Dupieux.
Girard (Louis).
Gagnot.
Genaille.
Holfeld.

Kœchlin (Henri).
Letourneau.
Le Bouvier.
Martin.
Pentecôte.
Pluot.

Puig (Jules).
Rouillard.
Saint-Martin.
Seilhac (de).

MÉDAILLES DE BRONZE

Ouvriers.

André.
Anciaux.
Bachelot.
Bettinger.
Boule.
Bignon.
Bunouf.
Bichet.
Boscus.
Besson.
Budin.
Cuny père.
Cuny fils.
Choblet.
Combe.
Clément.
Cacoit.
Chemidlin.
Cerveau.
Compoint.
Coupé.
Caussadette.
Calzia (Jean).
Cambours (Édouard)
Chambrin (Alfred).
Caillat.
Derrieu.
Deckert père.
Deckert fils.
Denizot.
Deveaux.
Develay père.
Develay fils jeune.

Develay fils aîné.
Fleuret.
Finet (Armand).
Fantout (Henri).
Fougeroux.
Froideveaux.
Gigant.
Gourgeon.
Gille.
Georges.
Guénard.
Guiot.
Guillemin.
Goupil.
Guinther.
Guy Claude.
Georgin (Eugène).
Guillout.
Hennekens.
Hippy.
Hazewer.
Hennebert (Georges)
Hocques (Georges).
Hitzel.
Hérouard.
Hue.
Imbert.
Jeager.
Jarry.
Jambu (François).
Lasgoutte.
Landeau.
Leroux aîné.

Leroux jeune.
Létang.
Lecœur.
Lataillade.
Leroy fils.
Locatelli.
Leroy père.
Lesage.
Laborie.
Léonard.
Lardé.
Leblond.
Lamblet fils.
Latournerie (Louis).
Léger.
Lefebvre.
Maimbourg.
Maréchal.
Meyer.
Morel.
Mouteau.
Malaskiewicz.
Marceau (Toussaint)
Marceau père.
Marceau fils.
Martin.
Morvaille.
Manini.
Meyer (Pierre).
Martel.
Marceau (Lazare).
Mauroy.
Mincel.

Moireau.
Moog.
Noël.
Pernet.
Pardon.
Pavy.
Ponsard.
Panozzo.
Pringuez.
Patry.
Pinel.
Petitcuenot.
Pagès.
Paris.
Pomiers (Pierre).
Paillardon (Auguste)
Quin.
Robert.
Ragot.
Ratazzi.
Roblot fils.
Roche.
Ruffier.
Stacoffe.
Sempé.
Tonneaux.
Thiry.
Truchot.
Thomas.
Tremblay.
Thomelin.
Tisserand.
Véronési.

§ 3. — Discours prononcés à la « Conférence Scientia » le 13 avril 1889.

Une société dite « Conférence Scientia », fondée en 1884 par MM. Max de Nansouty, Charles Richet et Gaston Tissandier, rédacteurs en chef des diverses revues scientifiques, avait organisé des banquets présidés par les plus distingués de ses membres et offerts à des personnalités telles que MM. Chevreul, Pasteur, Ferdinand de Lesseps, le général de Nansouty, Berthelot, de Brazza, A. Richet, Daubrée, le général Perrier, Georges Berger et Jules Simon. Parmi les présidents étaient : MM. Jamin, Charles Richet, Léon Say, Gaston Tissandier, Renan, Janssen, Verneuil, l'amiral Jurien de la Gravière, Friedel, R. Bischoffsheim, Gariel et Trélat.

On me fit l'honneur de m'offrir, le 13 avril 1889, le treizième dîner sous la présidence de M. Janssen, membre de l'Institut.

On me permettra de reproduire les discours qui furent prononcés à cette occasion, d'abord par M. Janssen, qui développa dans le langage le plus élevé les idées qui présidèrent à l'édification de la Tour, puis par moi-même, qui montrai son utilité et son but, et enfin par un de nos poètes les plus éminents, M. Sully-Prudhomme. Ce dernier avait été l'un des signataires de la fameuse protestation des artistes et, de même que celle de MM. Alexandre Dumas, Meissonier, Gounod, etc., qui m'avaient apporté leur témoignage, son opinion s'était modifiée dès que la Tour avait été construite.

DISCOURS DE M. JANSSEN

DE L'INSTITUT

Quand on a du talent, de l'expérience, une volonté forte, on arrive presque toujours à triompher des obstacles. Le succès est plus assuré encore si celui qui lutte est animé du sentiment patriotique, s'il aime à se dire que son œuvre ajoutera quelque chose d'important à la renommée de son pays, et que son succès sera un succès national. Mais il est des circonstances où ces éléments déjà si puissants prennent une force

irrésistible, c'est quand celui qui aime passionnément son pays voit ce pays injustement déprécié; c'est quand, par un de ces entraînements dont le monde donne tant d'exemples, et dont nous avons bénéficié nous-mêmes, peut-être plus qu'aucun autre peuple, on flatte la victoire, et on va jusqu'à refuser au vaincu d'un jour ses mérites les plus réels et ses supériorités les plus incontestables.

Alors, si des circonstances favorables se présentent, et s'il se rencontre un homme d'un grand talent, d'un caractère hardi et entreprenant, il s'éprendra de l'idée de venger en quelque sorte sa patrie, par la réalisation d'une œuvre grandiose, unique, réputée presque impossible; et, pour assurer son succès, il ne reculera devant aucune difficulté, supportera tous les déboires, restera sourd à toutes les critiques, et marchera obstinément vers son but, jusqu'au jour où, l'œuvre enfin terminée, son mérite, sa hardiesse, sa grandeur, éclatent à tous les yeux, désarment la critique, et changent la ligue du blâme en un concert général de louanges et d'admiration.

N'est-ce pas là, en quelques mots, l'histoire de la conception, de l'acceptation, de l'érection et du succès du grand édifice du Champ de Mars?

Cependant, il serait injuste de dire que ces sentiments, M. Eiffel ait été le seul à les éprouver. Tous ceux qui travaillent actuellement au Champ de Mars les ressentent, et c'est là sans doute le secret des merveilles qu'on nous y prépare.

Oui, tout le monde a compris que notre Exposition, en raison surtout de la date choisie, n'aurait de succès que par les prodiges d'art et d'industrie qu'on y accomplirait. Il fallait désarmer le monde à force de mérite et de talent, et tout nous indique qu'en effet le monde sera désarmé.

Bientôt, de toutes les parties du Monde, on viendra admirer les œuvres de cette nation étonnante, si merveilleusement douée, qui s'abandonne avec tant de facilité, qui se reprend avec tant de ressort, qui, au milieu des plus grandes péripéties de succès et de revers, reste toujours jeune, toujours généreuse, toujours sympathique, et qui n'aurait besoin que d'un peu de sagesse, de sens politique, d'esprit de suite et de conduite pour se trouver encore, et tout naturellement, à la tête des nations pour qui elle demeure comme une énigme et un perpétuel sujet de surprise et d'étonnement.

Mais laissons nos préoccupations, et ne pensons qu'à l'hôte que nous fêtons.

Cet hôte triomphe aujourd'hui, mais combien ce triomphe s'est fait attendre! On ne peut pas dire qu'on le lui ait escompté d'avance et qu'on l'ait fait jouir avant l'heure de son succès.

Et ceci me rappelle un dîner de la *Scientia* donné il y a plus d'une année. Ce dîner était offert à M. Berger, un des directeurs généraux de l'Exposition, et M. Eiffel y assistait. La Tour s'élevait alors au premier étage, et la critique sévissait dans toute sa force. Si la construction n'atteignait que son premier étage, la critique, elle, avait complété tous les siens, et elle se dressait de toute sa hauteur. Et notez que c'est précisément au moment où les plus grandes difficultés avaient été heureusement et habilement surmontées, que l'esprit de blâme se donnait toute carrière, montrant ainsi autant d'âpreté que d'aveuglement. Il faut s'arrêter un instant sur ces difficultés.

On sait que la Tour est essentiellement formée de quatre montants, prenant leurs points d'appui sur des massifs de maçonnerie, s'élevant d'abord obliquement, pour se redresser ensuite et se réunir au-dessus du second étage où ils ne forment qu'un seul corps jusqu'au sommet. La construction de ces pieds, qui devaient s'élancer en porte-à-faux depuis leurs bases jusqu'au premier étage, à 60 mètres de hauteur, c'est-à-dire à la hauteur de trois hautes maisons superposées, présentait des difficultés considérables. Des échafaudages d'appui, des tirants d'amarrage scellés dans la maçonnerie, ont permis de s'élever jusqu'au point voulu. Là se trouvaient déjà préparées les poutres horizontales qui devaient relier les quatre montants pour constituer la base sur laquelle seraient édifiées toutes les constructions du premier étage.

Or, l'édification de masses métalliques si considérables, montées en quelque sorte dans le vide, ne peut se faire avec une précision qui dispense de toute rectification au moment de l'assemblage. Le procédé employé pour obtenir ces rectifications montre bien la hardiesse et la puissance des moyens dont l'ingénieur dispose aujourd'hui. En effet, M. Eiffel n'hésita pas à soulever ces énormes pieds de la Tour et à leur donner les mouvements nécessaires pour qu'ils se présentassent à l'assemblage dans les conditions voulues. Or, surélever d'immenses pièces métalliques s'élevant en porte-à-faux presque à la hauteur des tours Notre-Dame sans compromettre l'équilibre précaire qu'elles recevaient des échafaudages, était on ne peut plus délicat. L'opération

réussit cependant. Des presses hydrauliques, agissant par l'intermédiaire de cylindres d'acier sur chacun des arbalétriers formant un des pieds de la Tour et les soulevant tous à la fois, permirent à ce pied de venir se présenter à l'assemblage; et les trous nombreux percés d'avance pour les rivets l'avaient été avec tant de précision qu'on put opérer rapidement la mise en rapport et réduire à un instant le moment psychologique de cette étonnante opération.

Les quatre grands montants réunis, on peut dire que la difficulté maîtresse de l'œuvre était surmontée, et que la Tour était virtuellement élevée.

Il faut admirer, comme elles le méritent, ces grandes opérations du génie civil contemporain; elles montrent tout ce qu'on peut attendre de l'art des constructions, quand celles-ci s'appuient sur la science.

Eh bien, c'est précisément, comme je viens de le dire, au moment où cette belle opération si délicate et si hardie venait d'avoir un plein succès, que l'œuvre était le plus vivement attaquée.

Pour moi, j'en étais presque indigné, et je me rappelle qu'au banquet dont je viens de parler, je ne pus retenir ma voix et que je voulus assurer M. Eiffel qu'il avait au moins avec lui quelques hommes qui admiraient son œuvre, qui appréciaient son courage et qui lui prédisaient le succès final et le retour de l'opinion.

Depuis, M. Eiffel a bien voulu me dire que mon témoignage lui avait été sensible et l'avait quelque peu réconforté.

Je n'ai pas eu à réformer mon jugement. De l'avis des plus compétents, l'érection de la Tour n'a pas été seulement une œuvre remarquable par les dimensions de l'édifice. Les études, la conduite des travaux, le chantier, comme on dit en terme d'ingénieur, ont été conduits avec un ensemble et une précision admirables. C'est que M. Eiffel, pour l'exécution de tous ces travaux qui l'avaient déjà rendu célèbre, avait su s'entourer depuis longtemps d'un état-major remarquable et se former de longue main des collaborateurs qui, aujourd'hui, sont consommés. C'est une armée qu'il a conduite sur vingt champs de bataille et qui, maintenant, pour la hardiesse, la précision, l'habileté, est sans rivale.

Voilà ce qui explique comment ce grand ouvrage a passé par toutes les phases de son érection, depuis l'avant-projet jusqu'à l'exécution finale, sans erreurs, sans mécomptes et avec une étonnante précision.

Je viens de prononcer le mot d'armée, et je l'ai fait à dessein. Je voudrais qu'il y eût entre les promoteurs de ces grands travaux et ceux qui les exécutent quelque chose des liens moraux qui, dans toutes les armées ayant accompli de grandes choses, ont uni les soldats à leur général, qui était pour eux un orgueil et une passion.

Croyez-le, on n'établira pas, entre tous les organes de ces grandes sociétés du travail, l'harmonie et l'entente qui en font la force, par les seules considérations d'argent et de salaire. Il faut exciter de plus nobles mobiles et faire comprendre aux travailleurs que celui, quel qu'il soit, qui a concouru à l'accomplissement d'une œuvre utile ou remarquable, a droit à une part d'honneur et d'estime.

Je voudrais encore dire un mot des usages scientifiques de la Tour. Elle en aura de plusieurs ordres, ainsi qu'on l'a indiqué, et je suis persuadé qu'on en découvrira auxquels on n'avait pas pensé tout d'abord.

Il est incontestable que c'est au point de vue météorologique qu'elle pourra rendre à la science les plus réels services. Une des plus grandes difficultés des observations météorologiques réside dans l'influence perturbatrice de la station même où l'on observe. Comment connaître par exemple la véritable direction du vent si un obstacle tout local le fait dévier? Et comment conclure la vraie température de l'air avec un thermomètre influencé par le rayonnement des objets environnants? Aussi les éléments météorologiques des grands centres habités se prennent-ils en général en dehors même de ces centres, et encore est-il nécessaire de s'élever toujours à une certaine hauteur au-dessus du sol.

La Tour donne une solution immédiate de ces questions. Elle s'élève à une grande hauteur, et par la nature de sa construction, elle ne modifie en rien les éléments météorologiques à observer.

Il est vrai que 300 mètres ne sont pas négligeables au point de vue de la chute de la pluie, de la température et de la pression; mais cette circonstance donne un intérêt de plus pour l'institution d'expériences comparatives sur les variations dues à l'altitude.

Je n'insiste pas sur les autres usages scientifiques qui ont été signalés avec raison. Je dirai seulement que la Tour pourrait donner lieu à de très intéressantes observations électriques. Il est certain qu'il se fera

presque constamment des échanges entre le sol et l'atmosphère par ce grand paratonnerre métallique de 300 mètres. Ces conditions sont uniques, et il y aurait un très grand intérêt à prendre des dispositions pour étudier le passage du flux électrique à la pointe terminale de la Tour. Ce flux sera souvent énorme et même d'observation dangereuse, mais on pourrait prendre des dispositions spéciales pour éviter tout accident, et alors on obtiendrait des résultats du plus grand intérêt.

Je voudrais encore recommander l'institution d'un service de photographies météorologiques. Une belle série de photographies nous donnerait les formes, les mouvements, les modifications qu'éprouvent les nuages et les accidents de l'atmosphère depuis le lever du soleil jusqu'à son coucher. Ce serait l'histoire écrite du ciel parisien dans un rayon qui n'a jamais été considéré.

Enfin, je pourrais signaler aussi d'intéressantes observations d'astronomie physique, et en particulier l'étude du spectre tellurique, qui se ferait là dans des conditions exceptionnelles.

Ainsi la Tour sera utile à la science ; ce n'est de sa part que de la reconnaissance, car sans la science jamais elle n'aurait pu être élevée. Le génie civil est fils de la science, aussi la science doit-elle le soutenir et le défendre chaque fois qu'il se réclame d'elle.

Mais déjà la science avait rendu justice au grand édifice du Champ de Mars.

Le grand savant dont les restes recevaient aujourd'hui même l'hommage de la France à Notre-Dame aimait à voir s'élever votre Tour, et, chose remarquable, elle eut sa dernière visite et sa dernière admiration.

« Que c'est beau ! » dit-il, en la voyant à sa dernière sortie. Après quoi il tomba dans cette prostration et cette douce agonie qui n'étaient que l'épuisement d'un corps qui avait franchi d'une manière si extraordinaire les limites imposées à la vie.

M. Chevreul, le centenaire, saluant le monument élevé à la gloire du siècle, dont il était la vivante personnification, vous ne pouviez désirer un hommage ni plus flatteur, ni mieux en situation. Voilà qui peut vous consoler de bien des critiques.

Ainsi la Tour du Champ de Mars, indépendamment de son usage principal qui est de faire jouir le public d'un panorama unique par l'élévation du point de vue et l'intérêt des objets environnants, aura des usages scientifiques très intéressants et très variés.

Mais il est un point de vue que nous ne devons pas oublier, parce qu'il est peut-être celui qui doit dominer tous les autres. Je veux dire que la Tour du Champ de Mars, par la grandeur de ses dimensions, par les difficultés que son érection présentait et par les problèmes de construction dont elle nous offre les heureuses solutions, réalise une démonstration palpable de la puissance et de la sûreté des procédés des constructions métalliques dont le génie civil dispose aujourd'hui. Cette démonstration, quelle occasion plus naturelle pour la donner, que cette Exposition qui est précisément un grand tournoi où les nations viennent en quelque sorte se mesurer et montrer leurs forces respectives, en science, en art, en industrie ! Et, du reste, oublie-t-on que les hommes n'ont jamais voulu se renfermer uniquement dans la construction d'édifices d'une utilité matérielle et immédiate ? Oublie-t-on qu'indépendamment du sentiment religieux qui a fait élever tant d'admirables édifices, on a vu, à toutes les époques de l'histoire, des monuments consacrés à la gloire militaire ou à la domination politique ? Or, si la guerre a voulu consacrer ses triomphes, pourquoi la paix ne consacrerait-elle pas les siens ? Les luttes armées et sanglantes des nations sont-elles donc plus belles et plus saintes que les luttes pacifiques du génie de l'homme avec la nature, pour en faire l'instrument de sa grandeur matérielle et morale ? Ces combats demandent-ils donc moins d'activité, de courage et de génie, et leurs fruits sont-ils moins durables et moins beaux ?

Cessons donc de marchander à ces luttes si nobles et si fécondes les signes sensibles qui les doivent glorifier. Célébrons au contraire des victoires où le vainqueur n'expie jamais son triomphe, où le vaincu voit complaisamment sa défaite, car ce vaincu c'est cette grande nature, c'est cette *alma mater*, qui veut que nous lui fassions violence, qui ne nous résiste que pour nous rendre dignes de la victoire, et nous récompense de nos triomphes, par la profusion de ses dons, par l'exaltation de toutes nos énergies et le sentiment légitime de notre grandeur intellectuelle.

Voilà les vrais combats que l'homme devra livrer de plus en plus, voilà les triomphes auxquels on ne dressera jamais assez d'arcs et de colonnes. Voilà l'avenir vers lequel le monde doit marcher. Ce sera l'honneur de la France d'avoir donné ce noble exemple, et la gloire de M. Eiffel de lui avoir permis de le donner.

DISCOURS DE M. EIFFEL

Voici la deuxième fois que, dans le banquet de *Scientia*, votre voix, cher et honoré Président, s'élève pour m'adresser des éloges qui, exprimés par vous, au milieu d'une telle assemblée, m'honorent et me touchent plus que je ne saurais l'exprimer.

Il y a deux ans, vous avez ici même salué la naissance de l'œuvre qui vient de s'achever et dont vous me permettrez bien de vous parler aujourd'hui, puisque c'est à son achèvement que je dois l'insigne honneur d'occuper une place où j'ai été précédé par tant d'illustres personnalités qui sont la gloire de la France.

Je n'oublierai jamais que ce sont les savants qui m'ont donné les premiers encouragements pour l'œuvre que je tentais, et je leur en ai gardé une profonde reconnaissance.

Aussi j'ai tenu à ce que cet édifice soit placé, d'une façon bien apparente, sous l'invocation de la science, et que sur la frise qui surmonte son soubassement, on puisse lire les noms des savants et des ingénieurs qui forment la glorieuse couronne de notre pays dans le siècle dont nous allons célébrer le centenaire.

Cette bienveillance, que je viens de rappeler, ne s'est pas démentie un seul instant, et ce n'est pas sans émotion que j'ai appris que vos deux premiers présidents d'honneur s'y intéressaient d'une façon toute spéciale : le vénérable M. Chevreul, dont la mort vient de nous affliger, suivait, par une visite presque quotidienne, les progrès de cette construction, et un savant non moins illustre, M. Pasteur, qui est l'une de nos admirations et dont l'existence nous promet encore tant de bienfaits à rendre à l'humanité, y porte une attention et une sympathie dont j'ai bien le droit de me montrer fier.

Il y a quelques jours encore, j'en recevais de précieux témoignages dans une ascension à la plate-forme de 300 mètres que je faisais avec MM. Mascart, Cornu et Cailletet.

Sur cette étroite hune, qui semble isolée dans l'espace, nous étions ensemble pris d'admiration devant ce vaste horizon, d'une régularité de ligne presque semblable à celle de la mer, et surtout devant l'énorme coupole céleste qui semble s'y appuyer et dont la dimension inusitée donne une sensation inoubliable d'un espace libre immense, tout baigné de lumière, sans premiers plans et comme en plein ciel : devant ce spectacle, au milieu de cet air vif et pur qui faisait flotter avec bruit les longs plis du drapeau aux belles couleurs de France, qui venait d'y être déployé depuis quelques jours, nous échangeâmes quelques mots émus qui consacraient cette sympathie scientifique à laquelle j'attache tant de prix.

J'espère pouvoir aussi vous y recevoir bientôt, cher et vénéré Président, et vous montrer les trois laboratoires dont l'emplacement vient d'être arrêté. L'un sera consacré à l'astronomie ; je compte que vous vous y trouverez dans des conditions favorables pour vous y livrer aux belles recherches d'astronomie physique qui ont illustré votre carrière. Le second, dont les appareils enregistreurs seront reliés au Bureau central météorologique, est destiné à la physique et à la météorologie ; MM. Mascart et Cornu en pensent retirer grand profit pour l'étude de l'atmosphère. Le troisième est réservé à la biologie et aux études micrographiques de l'air ; organisé par M. Hénocque, il ne sera pas moins utile à la science. Ai-je besoin d'ajouter que ces laboratoires seront libéralement ouverts aux savants ?

Sans parler d'autres nombreuses expériences que beaucoup entrevoient, M. Cailletet me permettra de vous dire qu'il étudie en ce moment un grand manomètre à mercure avec lequel on pourra réaliser avec précision des pressions allant jusqu'à 400 atmosphères.

Tous ces projets, développés devant moi, me remplissaient d'une satisfaction intime, en me démontrant que tant d'efforts n'avaient pas été faits en vain au point de vue du progrès scientifique.

La foule non plus ne s'y est pas trompée : nous éprouvons un tel besoin de nous élever au-dessus de ce sol auquel le joug de la pesanteur nous attache, que cette idée de l'*excelsior* a de tout temps passionné les esprits, et qu'il semble que, créer des édifices de hauteur inusitée, c'est reculer les bornes de la puissance humaine. Cela était, en effet, bien difficile autrefois ; mais maintenant, avec les nouvelles ressources que donne l'emploi du fer, la sûreté des méthodes qu'il comporte, on n'est plus effrayé par de pareils problèmes, et à voir la facilité relative avec laquelle on a atteint cette hauteur de mille pieds, qui avait hanté, mais en vain, le cerveau des Anglais et des Américains, il semble qu'il n'y aurait pas de bien grands obstacles à la dépasser notablement.

Quoi qu'il en soit, c'est grâce aux recherches des savants mathématiciens français qui ont fondé les méthodes que nous employons, c'est grâce aux éminents ingénieurs qui ont posé les principes des constructions métalliques, qui sont l'une des branches les plus caractéristiques de l'activité de l'industrie française, que l'œuvre dont je viens de vous parler si longuement et peut-être, avec trop de complaisance, a pu être édifiée. En même temps que les belles constructions du Champ de Mars, j'espère qu'elle montrera au monde que nos ingénieurs et nos constructeurs français tiennent encore une grande place dans l'art de construire, comme nos artistes et nos littérateurs occupent le premier rang dans l'art contemporain.

Je parle devant un auditoire trop au courant des faits modernes pour que je puisse penser vous apprendre quelque chose que vous ne sachiez déjà sur le rôle considérable des ingénieurs français à l'étranger. Cependant, à l'occasion d'un discours que je prononçais récemment, à la séance d'inauguration de la présidence de la Société des ingénieurs civils, j'eus à étudier ce vaste et beau sujet, et je ne vous cacherai pas que je fus étonné moi-même des preuves saisissantes de notre activité nationale, en ce qui regarde les travaux publics.

En effet, cette part dans le développement industriel des nations est considérable ; elle dépasse peut-être celle de tout autre peuple, sans en excepter l'Angleterre. Elle a commencé à se produire vers 1855, à l'une des époques les plus brillantes et les plus prospères de l'industrie française, et s'étendit presque simultanément en Russie, en Italie, en Espagne, en Portugal et en Autriche. L'ingénieur français n'est pas cet être casanier que la légende condamne à ne pas quitter le sol de la patrie. Au contraire, pendant ces trente dernières années, on a pu, en tous les points du monde, constater son activité et son influence.

Qui de nous, pendant ses voyages à travers l'Europe et au delà des mers, n'a reconnu, presque avec étonnement, tellement nous avons de méfiance de nous-mêmes et de bienveillance innée pour les autres, que les travaux les mieux conçus, les mieux exécutés et de l'apparence la plus satisfaisante, ont été accomplis par des ingénieurs français.

Si on entre dans la nomenclature détaillée de ces travaux, on reste étonné de leur importance, qui nous a fait, sans qu'on puisse être taxé d'exagération, des initiateurs pour un grand nombre de nations, lesquelles ont depuis appris, au moins en Europe, à se passer de nous. Mais le monde est grand, et le besoin d'expansion lointaine trouve son aliment, non seulement dans nos colonies et nos pays de protectorat, mais aussi dans le grand nombre des nations qui ont encore conservé leurs anciennes sympathies pour la France, telles que toute l'Amérique du Sud, et notamment le Brésil, le Chili, l'Équateur, la République Argentine, où une légion d'ingénieurs, appartenant au corps des ponts et chaussées ou ingénieurs civils, propage, en ce moment même, le renom de la science et de la probité françaises. Nos vœux les accompagnent, et vous voudrez bien me permettre, en ma qualité d'ingénieur, de vous demander de vous joindre à moi dans une commune pensée pour les adresser à ces pionniers de l'influence de notre pays au dehors.

Il me reste à vous remercier encore du grand honneur que vous venez de me faire et à vous assurer que j'en conserverai toujours le plus vif souvenir. Je l'attribue beaucoup moins à ma personne qu'à l'œuvre elle-même, que j'ai essayé de rendre digne, aux yeux du monde que nous convions à notre centenaire, du génie industriel de la France.

DISCOURS DE M. SULLY-PRUDHOMME

DE L'ACADÉMIE FRANÇAISE

Messieurs,

C'est avec une timidité bien naturelle que, rimeur égaré dans une société de savants par une insigne faveur, je me permets de prendre la parole dans ce banquet. Mais pouvais-je me résigner au silence ? J'ai signé une protestation d'artistes et d'écrivains contre le gigantesque édifice dont nous fêtons ce soir le hardi créateur, et je tiens à ce que vous n'ignoriez pas combien cependant, membre de la *Scientia*, j'avais à cœur d'associer mon hommage au vôtre. Je n'aurais pas voulu vous laisser craindre d'avoir introduit un traître dans la place, et j'aurais été trop humilié d'être jugé par vous incapable de partager non seulement vos travaux, mais encore vos admirations.

Si j'avais été appelé à formuler cette protestation fougueuse, je l'aurais fait plutôt avec un respect

plaintif, car deux sentiments divisent mon cœur : d'une part, un grand amour de la poésie, peur laquelle vous témoignez en ma personne une déférence qui vous venge noblement ; et, d'autre part, une vive gratitude pour la science, dont j'ai sucé le lait dans ma première jeunesse et à laquelle je dois le meilleur de ma discipline intellectuelle. Ah ! combien j'aurais souhaité de pouvoir admirer la Tour Eiffel comme une fleur ! Et quel héroïsme il m'a fallu pour oser choisir entre mon culte de la grâce et ma vénération pour le génie asservissant la force.

Je n'avais, heureusement, jugé et condamné que par défaut, et devant l'œuvre accomplie et victorieuse, je me sens aujourd'hui plus à l'aise que d'autres pour en appeler de ma propre sentence. L'idée que je me fais de mon art me rend sans doute la conversion plus facile qu'à mes confrères, plus facile surtout qu'aux artistes dont les œuvres s'adressent aux yeux. La poésie, en effet, me semble être, comme la musique, un art où la forme, empruntant le moins possible à la matière, n'est plus, pour ainsi dire, que le frisson même de l'âme. Aussi le poète, à mon avis, peut-il regretter que la Tour Eiffel ne caresse pas les yeux, sans perdre pour cela le droit ni faillir au devoir d'y saluer une audace magnifique dont la majesté suffit amplement à le satisfaire. Ce colosse rigide et froid peut dès lors lui apparaître comme un témoin de fer dressé par l'homme vers l'azur pour attester son immuable résolution d'y atteindre et de s'y établir.

Voilà le point de vue qui a réconcilié mon regard avec ce monstre, conquérant du ciel. Et quand même, en face de sa grandeur impérieuse, je ne me sentirai pas converti, assurément je me sentirais consolé par la joie fière, qui nous est commune à tous, d'y voir le drapeau français flotter plus haut que tous les autres drapeaux du monde, sinon comme un enseigne belliqueux, du moins comme un emblème des aspirations invincibles de la patrie.

§ 4. — Embrasements et illuminations.

L'Administration de l'Exposition s'était chargée, pour augmenter l'éclat de ses fêtes, d'illuminer chaque soir la Tour à l'aide d'un grand nombre de becs de gaz disposés dans des globes de verre opalin.

Fig. 237.

Ces globes, espacés de 0,35 *m* environ, formaient des cordons lumineux disposés sur chaque plate-forme, sur les soubassements, ainsi que sur le pourtour des grands arcs de la base. L'ensemble de cette illumination était d'un effet extrêmement heureux.

En outre, par certaines soirées de fêtes, un ou plusieurs embrasements étaient faits avec 100 flammes de Bengale rouges, disposées aux différents étages de la Tour. L'effet de ces flammes entourées de torrents de fumée rouge au milieu desquels se dessinait, vivement éclairée, la charpente métallique, produisait une impression grandiose et fantastique, dont tous ceux qui y ont assisté ont conservé le souvenir. La figure 237 en donne une reproduction qui est très au-dessous de la réalité.

Ces illuminations et embrasements ont coûté une somme importante. L'installation, faite par MM. Beau et Bertrand-Taillet, s'est élevée à 40.000 *fr.*

La dépense du gaz a été la suivante :

Cordons des 2e et 3e étages.	65,5 m^3	à l'heure.
Arcs, soubassements et 1er étage.	356	—
Total.	421,5	—

Pour une durée de 3 heures et demie et un prix de 0,15 *fr* au m^3, la dépense journalière a été de 1.475,25 × 0,15 = 221,29 *fr*, et pour 188 jours d'allumage : 41.604,00 *fr*.

Les frais de main-d'œuvre de l'allumage étaient de 350 *fr* par soirée, soit dans leur ensemble 65.800 *fr*.

Pendant 35 soirées, il y a eu 72 embrasements qui, à raison de 900 *fr.* chacun, ont donné lieu à une dépense de 64.800 *fr.*

L'ensemble de toutes les dépenses d'illumination s'est élevé à 212.204 *fr.*

§ 5. — Bureau postal de la 3e plate-forme.

Pendant la durée de l'Exposition, l'Administration des Postes et Télégraphes avait installé à la 3e plate-forme un bureau qui expédia plusieurs centaines de mille de lettres ou dépêches et surtout des cartes postales à l'effigie de la Tour. Du haut de celle-ci, la plupart des visiteurs tenaient à envoyer à leurs amis ou parents un témoignage de leur ascension.

Pour satisfaire la manie d'une certaine partie du public et répondre à son désir d'inscrire sur les murailles son nom et les pensées que la situation lui inspirait, on avait disposé sur certains points des parois des feuilles de papier qui étaient enlevées chaque jour, après avoir été complètement recouvertes d'inscriptions de toute nature. La collection en était vraiment curieuse.

§ 6. — Imprimerie du *Figaro* de la Tour Eiffel.

Le journal *le Figaro* avait établi sur la 2e plate-forme un pavillon situé près de l'ascenseur Otis de la pile Nord, représenté à la planche XIX et dont l'aspect extérieur est rappelé par la figure ci-dessous. Il y installa une imprimerie avec une presse Marinoni destinée à la publication d'une édition spéciale sous la direction de M. Émile Berr. Ce journal quotidien, entièrement rédigé, composé et imprimé dans ce pavillon,

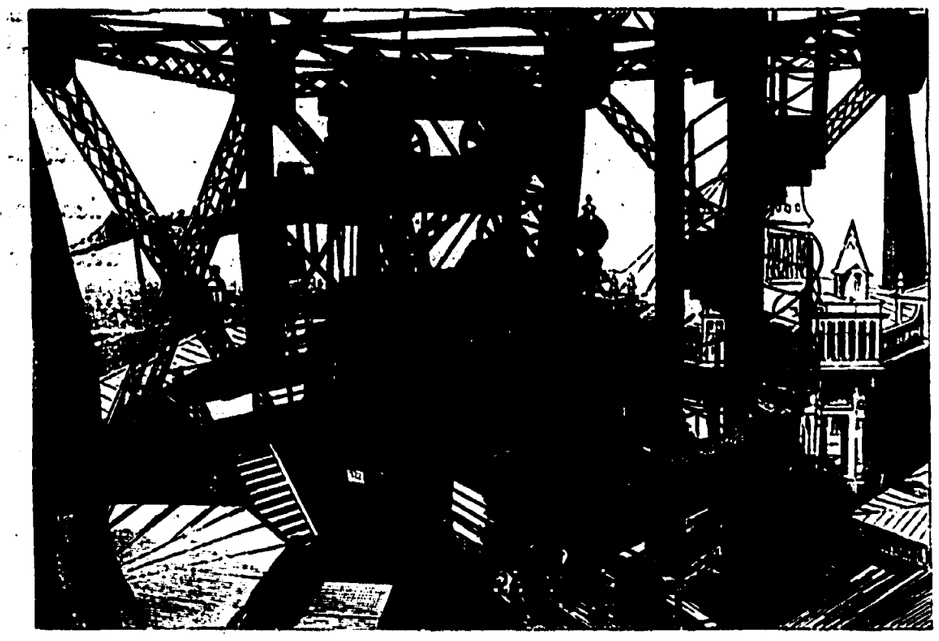


Fig. 238.

sous les yeux des visiteurs, contenait tous les faits intéressants de l'Exposition et principalement ceux relatifs à la Tour. Le personnel employé comprenait vingt-quatre collaborateurs. Il parut régulièrement du 15 mai au 1er octobre.

Ce pavillon recevait chaque jour de nombreux visiteurs à la disposition desquels était mis un registre pour y inscrire leurs noms et leurs impressions qui étaient journellement reproduits dans chacun des numéros.

Au moment de la visite du Shah de Perse, *le Figaro* de la Tour fit paraître un numéro spécial composé moitié en persan, moitié en français. Un autre numéro très original fut celui qui reproduisit les affiches du chemin de fer Decauville rédigées en vingt-huit langues différentes.

§ 7. — Principales visites faites au sommet.

Il est intéressant de signaler les principales visites faites à la Tour, soit par des souverains ou personnages princiers, soit par des personnalités marquantes, soit par des sociétés savantes ou autres qui y organisèrent de nombreux banquets :

1889. Juin	5.	Mission norvégienne d'officiers de marine.
—	7.	Association des anciens élèves de l'École polytechnique de Zurich.
—	10.	Leurs Altesses Royales le prince et la princesse de Galles, les princes Albert, Victor et Georges, leurs fils, et les princesses Maud et Victoria, leurs filles.
—	10.	Délégués des Compagnies de gaz étrangères.
—	22.	Ingénieurs civils américains.
—	27.	Dinah Salifou, roi des Nallous, et sa suite.
Juillet	4.	Ingénieurs anglais (Mechanical Engineers) présidés par M. Cockrane.
—	10.	M. Carnot, Président de la République Française.
—	23.	S. M. le roi de Grèce, Georges Ier.
Août	3.	S. M. le shah de Perse, Nasser-Eddin.
—	5.	Congrès international de thérapeutique.
—	8.	Mission taïhitienne.
—	9.	Congrès international d'hygiène.
—	10.	Congrès de psychologie physiologique.
—	12.	Association des étudiants français et étrangers (au nombre de 510).
—	13.	Edison.
—	17.	Les princes tunisiens Taïeb Bey et Mohamed.
—	18.	S. A. R. le prince Baudouin, héritier de la couronne de Belgique.
—	20.	Le Bey de Djibouti, Abou-Beker.
—	22.	Délégation des ouvriers américains.
—	22.	S. A. R. le prince héritier de Siam, Kitiyahara, et ses frères.
—	22.	Visite des chefs arabes.
—	28.	S. A. R. le duc de Bragance, actuellement roi de Portugal.
—	29.	S. A. R. le tzarevitch, le grand-duc Georges et le grand-duc Alexandre Michaëlovitch.
Septembre	7.	M. et Mme Gladstone.
—	9.	Duc de Cambridge, généralissime de l'armée anglaise.
1889. Septembre	9.	Leurs Altesses les princes égyptiens Abbas (actuellement khédive), et Mehemet-Ali, son frère.
—	14.	Les princes de la famille royale du Japon, conduits par le prince Zahchito, fils adoptif de l'Empereur.
—	17.	Osman-Gassy, roi du Boundou.
—	18.	Les ingénieurs russes, espagnols, portugais, chiliens, brésiliens et argentins.
—	19.	Nordenskiold et la Commission internationale du Mètre, avec M. Joseph Bertrand.
—	21.	Délégation d'ouvriers anglais.
—	25.	Les ambassadeurs marocains.
—	26.	Les ingénieurs de l'Iron and Steel Institute.
—	30.	Les princes Saïd et Omar-Toussoun, petits-fils du khédive Saïd-Pacha.
Octobre	15.	L'ambassade chinoise.
—	23.	S. A. R. le duc d'Edimbourg.
—	30.	Le prince d'Oldenbourg.
Novembre	2.	S. M. la reine d'Espagne Isabelle II.
—	7.	Ambassade de Zanzibar.
1891. Février	20.	S. A. R. la princesse Marguerite de Prusse.
Juin	13.	Le Président de la République Française.
Août	21.	LL. MM. le roi Milan et son fils, Alexandre Ier, roi de Serbie.
Septembre	5.	LL. AA. II. le grand-duc et la grande-duchesse Wladimir de Russie et leurs fils.
—	5.	Le prince Damrong de Siam.
1892. Mai		S. M. le roi de Suède et Norvège, Oscar II.
1893. Octobre	22.	Les officiers de l'escadre russe.
1896. Juillet	17.	Li-Hung-Tchang, ambassadeur extraordinaire de Chine (déjeuner offert par M. Hanotaux, Ministre des Affaires Étrangères).
Septembre	22.	La conférence météorologique internationale.
1897. Juillet		Les ambassadeurs marocains.
Septembre	12.	S. M. le roi de Siam, Chula-long-Korn.

Un registre placé au sommet dans le salon réservé conservait les signatures des personnes qui y étaient reçues. Nous donnons à la fin de ce volume la reproduction de quelques-unes d'entre elles.

§ 8. — Tour de Wembley-Park.

A la suite du succès qu'avait obtenu la Tour à l'Exposition, une Compagnie anglaise ayant à sa tête

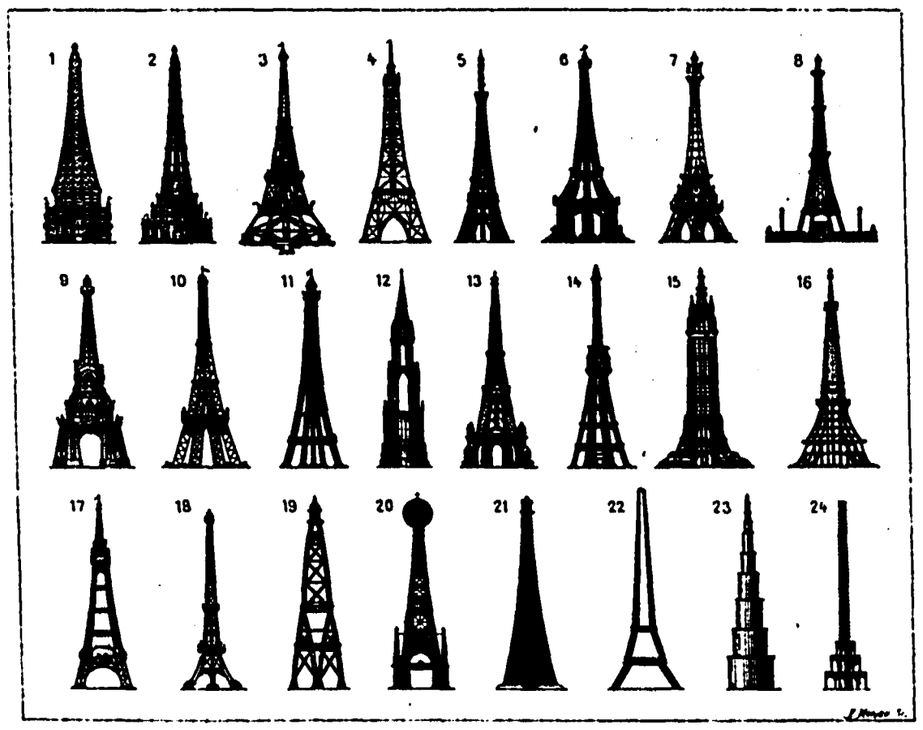


Fig. 230. — Les projets de Tours exposés à Londres.

M. Édouard Watkin, et parmi ses ingénieurs M. Benjamin Baker, le célèbre constructeur du pont du Forth,

ouvrit un concours international pour le projet de la construction à Londres d'une tour devant rivaliser avec la Tour Eiffel.

Deux prix étaient offerts, l'un de 12.500 *fr.*, l'autre de 6.250 *fr.*, aux deux meilleurs projets d'une construction ayant une hauteur minimum de 1.200 pieds (366 *m*). Le programme n'imposait pas la nature des matériaux, mais spécifiait seulement que si l'acier était préféré, il ne devait pas travailler à une tension de plus de 11,80 *kg* par *mm*² sous l'effort d'un vent, agissant sur la tour, de 273 *kg* par *m*². Le choix du type d'ascenseurs était laissé à la volonté des concurrents.

Soixante-six projets furent présentés ; leur dessin et leur description sommaire firent l'objet d'une publication

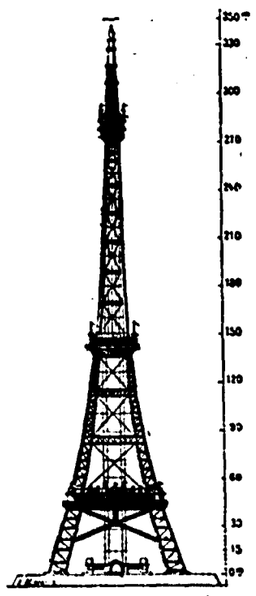


Fig. 240. — Vue en élévation de la Tour de 350 *m*, telle qu'elle sera après son achèvement.

Fig. 241. — État récent des travaux.

faite par la Compagnie de la grande Tour de Londres, de laquelle nous avons extrait un certain nombre de spécimens (Voir fig. 239).

Le jury du concours s'est exprimé en ces termes (1) :

« Les projets envoyés au concours ont des mérites très variés, et bien que chacun d'eux renferme des parties excellentes, nous devons avouer que l'ensemble du concours a été pour nous un véritable désappointement, et qu'il n'y a pas un seul projet dont nous puissions recommander l'exécution.

« Pour rendre justice aux compétiteurs, il convient cependant d'ajouter que l'existence de la Tour Eiffel et le désir d'éviter des imitations ont considérablement accru les difficultés du problème, *car la Tour Eiffel réunit les moyens les plus rationnels et les plus évidents de combiner un monument présentant un aspect architectural, d'une construction économique.*

« Un certain nombre de projets étaient naturellement excentriques et extravagants, tandis que d'autres ne présentaient aucun mérite architectural.

« Nous n'avons éprouvé aucune difficulté à éliminer la plus grande partie des projets qui nous étaient présentés, mais il a fallu des études très suivies pour arriver à décerner la récompense finale. En nous confinant à l'examen des projets élaborés par des hommes compétents, nous avons trouvé que, dans certains cas, on s'était préoccupé avant tout de réaliser une construction économique, tandis que, dans d'autres cas, au contraire, on s'était attaché de préférence à l'effet architectural.

« En comparant les projets, nous nous sommes efforcés de nous placer au même point de vue que l'auteur ou les auteurs de chacun des projets, et nous avons attaché une importance toute spéciale au temps et aux soins employés pour la confection des dessins, aux calculs de résistance et aux devis de prix de construction.

---

(1) *La Nature*, 1890, 2e semestre, p. 77.

« Après examen attentif, nous avons décidé de distribuer ainsi les récompenses : premier prix (500 guinées) : MM. Stewart, Maclaren et Dünn; second prix (250 guinées) : MM. Webster et Haigh. »

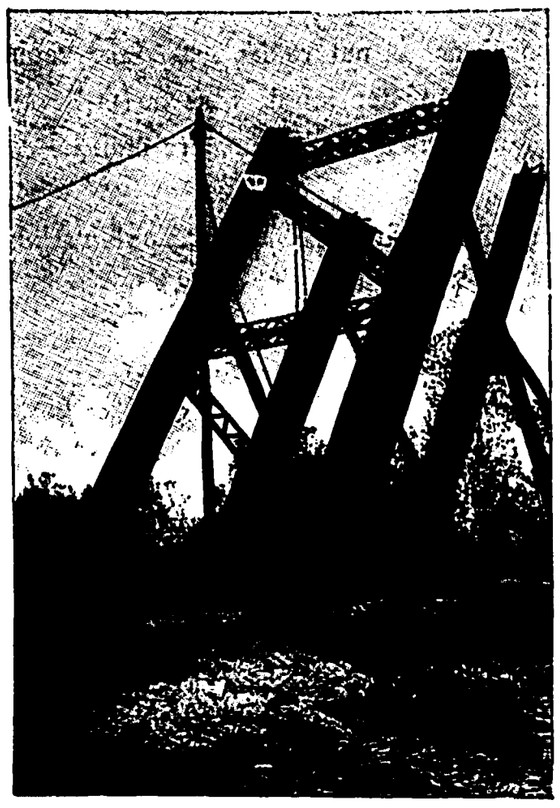


Fig. 242. — Commencement des travaux de la Tour de 350 *m*, de Wembley-Park.

Le projet ayant obtenu le n° 1 (n° 8 de la figure) a une hauteur de 1.200 pieds, une base octogonale de 300 pieds de diamètre. Elle est construite en acier et son poids est de 14.659 *t.* Son prix de revient est estimé à 9 millions de francs (1).

L'emplacement choisi était le Wembley-Park, aux environs de Londres.

Quand il s'agit de passer à son exécution, les plans de M. Stewart durent subir de profondes et nombreuses modifications après entente entre ce dernier et M. Benjamin Baker, ingénieur conseil de la Compagnie. D'octogone, la Tour devint carrée et prit avec la Tour Eiffel une ressemblance encore plus grande (Voir fig. 240); chacun des quatre piliers fut composé de quatre arêtiers rectangulaires entretoisés, et le système de construction fut presque identique. — Nous nous reportons, sans insister davantage, aux figures ci-jointes, dont quelques-unes sont presque semblables, même comme procédé de montage, à celles que nous avons données dans le cours de cet ouvrage : ce rapprochement nous a causé une réelle satisfaction.

Les numéros de l'*Engineer* du 8 septembre 1893 et du 11 mai 1894 donnent tous les détails de la construction et des photographies du commencement des travaux. Le 15 juin 1893, on posa les premières pièces métalliques et, en janvier 1894, les piliers atteignaient le niveau de la première plate-forme, à 45 *m* de hauteur.

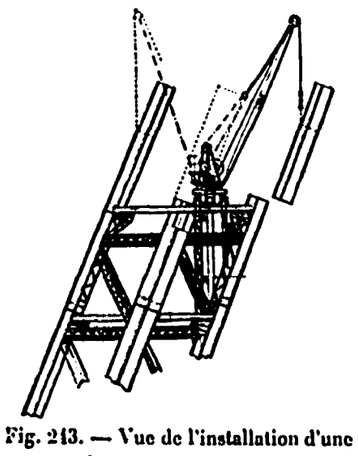


Fig. 243. — Vue de l'installation d'une des grues électriques.

Quant aux ascenseurs, on a jugé que l'on pouvait disposer sans inconvénient du sol placé au centre de la Tour, et on a pu disposer verticalement tous les ascenseurs, ce qui est une grande simplification. Les ascenseurs inclinés de la Tour Eiffel correspondaient, en raison de la situation de celle-ci dans l'Exposition, dont elle constituait une sorte d'entrée triomphale, à des nécessités architecturales, qu'on a pu écarter, grâce à la situation de la Tour de Wembley-Park, isolée sur une éminence plantée d'arbres de haute futaie. Les deux ascenseurs verticaux allant à la première plate-forme sont portés par des pistons hydrauliques; les deux autres ascenseurs monteront directement de la première plate-forme au sommet : ils auront une course de 275 *m* et seront mus par des treuils à vapeur.

Pour des motifs que nous n'avons pu connaître, soit techniques, soit financiers, les travaux ont été interrompus et n'ont pas dépassé la première plate-forme.

(1) Ces poids et ce prix justifient ce que nous avons dit dans le chap. II de la II[e] partie, p. 20 et 21 de cet ouvrage, que ce n'est qu'avec une augmentation considérable dans le poids (la Tour Eiffel pèse 9.700 *t*, p. 20) que l'on peut augmenter d'une hauteur de 50 *m* seulement, celle à laquelle on s'est arrêté pour la Tour de 300 *m*.

HUITIÈME PARTIE

MODIFICATIONS EN VUE DE L'EXPOSITION DE 1900

CHAPITRE I

PLATES-FORMES.

L'Exposition de 1900 et l'affluence des visiteurs sur laquelle on doit compter à ce moment ont rendu indispensables de remédier à certains des inconvénients qui s'étaient manifestés pendant l'exploitation de 1889.

Il était nécessaire :

1° De faciliter la circulation sur les plates-formes en leur donnant plus de surface utilisable ;

2° De modifier le système des ascenseurs pour procurer un plus grand nombre d'ascensions.

Ce sont ces modifications que nous allons décrire en y joignant la description des nouveaux moteurs mécaniques qui en ont été la conséquence.

§ 1. — Traité avec l'Exposition.

Une convention préalable fut passée, à la date du 28 décembre 1897, entre l'Administration de l'Exposition et la Société de la Tour, pour que la Tour fît partie intégrante de l'Exposition dans les mêmes conditions qu'en 1889. Par contre, la Société prenait à sa charge le service des illuminations qui incombaient autrefois à l'Exposition.

Ces illuminations devaient être faites non plus au gaz, mais entièrement à l'électricité, et de plus avoir une importance beaucoup plus grande : en outre des parties de la Tour antérieurement illuminées, chacune des arêtes extérieures, sur toute la longueur du sol au sommet, devait former une série de grands cordons lumineux. Le nombre de lampes que nécessite cette illumination générale n'est pas moindre de 5.000. Aussi, a-t-on été conduit à augmenter dans de très grandes proportions les organes électriques anciens.

§ 2. — Première plate-forme.

Comme on ne pouvait songer à augmenter la surface même de la première plate-forme, on a dû se borner à mieux utiliser celle existante pour les facilités de la circulation. Notamment, le passage qui existait entre le derrière des restaurants et la balustrade intérieure du vide central de la plate-forme était beaucoup trop étroit pour qu'une circulation importante pût s'y produire. De plus, ces façades postérieures avaient été traitées trop simplement pour avoir un attrait quelconque, de sorte que cette partie de la plate-forme était presque inutilisée. En conséquence, on décida d'augmenter le passage intérieur dont nous venons de parler jusqu'à une largeur minimum de 2 *m*, en reculant en conséquence les façades postérieures des bâtiments. On chercha en même temps à leur imprimer un caractère plus gai et plus vivant en leur donnant une silhouette

plus animée et en y installant des boutiques et des bars. Cette ornementation nouvelle a été faite en harmonie avec le caractère de chacun des bâtiments et est représentée dans la planche XLVII.

Cet élargissement du passage libre et l'emplacement de ces boutiques ont été pris en majeure partie sur les prolongements en terrasse affectés aux offices et aux services accessoires. Ces offices ont été reculés à l'intérieur en empiétant sur la surface réservée aux consommateurs, laquelle se réduit à deux espacements de fermes sur les trois travées. Mais cette diminution est plus apparente que réelle et ne touche que très peu au nombre des places réellement occupées par le public.

Les figures 1 à 6 de la planche XLVII indiquent la nouvelle disposition adoptée pour les restaurants Anglais, Hollandais et Russe. Le détail du plan de cette façade est donné dans la figure 2 de cette même planche.

Quant au restaurant Français, on n'y a fait d'autres modifications que le changement de décoration de la façade et la suppression des deux petits salons réservés qui rendaient obscure et presque inutilisable la plus grande partie de la travée correspondante.

§ 3. — Deuxième plate-forme.

Les modifications ont été beaucoup plus importantes sur cette plate-forme que sur la première. En effet, pendant l'Exposition de 1889, elle était particulièrement encombrée, non seulement en raison de l'emplacement nécessaire pour le changement des ascenseurs inclinés à l'ascenseur vertical, et pour la formation des queues qui en étaient la conséquence, mais encore par l'existence des prolongements inutilisés des chemins des ascenseurs Combaluzier et par celle des grands réservoirs cylindriques alimentant les ascenseurs.

Comme cette plate-forme est l'une des plus agréables de la Tour, on résolut de lui donner le plus grand attrait possible pour les visiteurs, et on augmenta tout d'abord la surface inférieure par une bande au pourtour de 2 *m* de largeur, et on créa un deuxième étage en terrasse sur une partie de sa superficie ; enfin on réunit en un unique pavillon central tous les petits édicules qui étaient disséminés sur la plate-forme.

Mais cela entraînait à une notable augmentation du poids propre de la plate-forme, laquelle n'eût pas été sans inconvénient. La condition essentielle de cette transformation était la suppression des réservoirs cylindriques si encombrants, alimentant les ascenseurs et dont le poids, pleins d'eau, dépassait 100 tonnes.

C'est ainsi que l'on a été conduit à alimenter les ascenseurs accédant à cette plate-forme par un système d'accumulateurs reposant sur le sol, et en outre à supprimer le hourdis Perrière, ainsi qu'il sera dit plus loin.

La première modification consista à enlever la galerie couverte du pourtour et à augmenter de 2 *m* la saillie des consoles portant le plancher. A cet effet, des consoles nouvelles en tôle pleine furent appliquées en avant des anciennes, suivant la disposition représentée dans la figure 3 de la planche XLVI. On créa ainsi une plate-forme découverte de 4 *m* de largeur, assurant une large et agréable circulation en plein air.

Une seconde modification, consistant dans la construction d'une terrasse, fut aussi réalisée.

Au droit de la face intérieure des grandes poutres de ceinture et à chaque intervalle de 3,36 *m*, s'élève un pilier en fer de 3,312 *m* de hauteur supportant à ce niveau un balcon faisant une saillie de 0,70 *m* et muni sur son pourtour extérieur d'une légère balustrade. En arrière de ce balcon saillant sur le plan des faces extérieures des arbalétriers de la Tour, le plancher, soutenu par deux nouveaux piliers en fer, se prolonge jusqu'au pavillon central sur une largeur de 8 *m*. Les trois piliers sont reliés par une entretoise de 0,25 *m* de hauteur à laquelle s'attachent les solives en double T de 160 × 90 espacées de 1,10 *m*. Sur ces solives, sont rivées des tôles de 3,5 *mm* d'épaisseur raidies par des cornières de 40 *mm*. Ces tôles seront recouvertes par du linoléum et formeront un promenoir de 8,90 *m* de largeur. L'ensemble de ces dispositions est représenté dans les figures 1 et 2 de la planche XLVI.

Ce plancher, incliné à l'extérieur pour permettre l'écoulement des eaux pluviales, enclôt à l'intérieur un espace octogonal de 16,35 *m* de largeur et de 6,725 *m* de côté, affecté au pavillon central. Il ne touche pas à l'emplacement des ascenseurs Est et Ouest et communique avec le sol de la plate-forme par huit escaliers, placés dans le voisinage des piliers.

Le pavillon central, représenté figures 7 à 10 de la planche XLVII, comprend un rez-de-chaussée et un premier étage. Les montants extérieurs de ce pavillon sont en bois. Les planchers et la charpente sont en fer; les dallages, les plafonds, les cloisons intérieures, ainsi que les remplissages des façades, sont en métal déployé hourdé en plâtre.

Au rez-de-chaussée sont installés : la cage de l'ascenseur vertical, avec son entrée et sa sortie au niveau de la plate-forme, un bar et son office, trois boutiques, des water-closets, le bureau des tickets, ainsi que les escaliers d'accès au premier étage. Au-dessous est une cave.

La partie du plancher de la terrasse qui environne ce pavillon sert d'abri aux promeneurs en cas de mauvais temps. Les boutiques sont éclairées par le jour venant de l'étage supérieur à travers des verres-dalles.

Le premier étage comprend également la cage de l'ascenseur vertical avec son entrée et sa sortie au niveau de la terrasse, un bureau d'administration et enfin les salles du restaurant auxquelles on accède par un escalier de quelques marches.

Au rez-de-chaussée et entre les grandes poutres de l'ascenseur central est installé un réservoir en tôle de 30 m^3 de capacité, servant à l'alimentation de l'ascenseur Otis conservé au pilier Nord.

Quant au dallage, nous avons vu que le hourdis Perrière, qui à l'origine était recouvert par un plancher en bois asphalté, avait reçu ensuite un dallage en ciment armé (système Coignet); le poids de ce dallage y compris hourdis était de 145 *kg*. Dans la construction actuelle, le hourdis Perrière est supprimé, et le dallage est fait uniquement par des dalles rectangulaires en ciment armé qui s'appuient sur le solivage par l'intermédiaire de chevrons en bois. Ces dalles, qui arrivaient toutes prêtes au chantier, ont un poids de 70 *kg* seulement par mètre carré. Leurs dimensions sont de : longueur 1,35 *m*, largeur 0,67 *m*, épaisseur 0,030 *m*. Elles sont munies à leur pourtour de rebords saillants de 60 *mm* d'épaisseur, pour faciliter leur appui sur le solivage. Entre les joints est disposé du caoutchouc pour permettre à la dilatation de se produire, tout en assurant l'étanchéité.

Par suite de ces diverses modifications, le poids total de la plate-forme est resté ce qu'il était précédemment (1).

§ 4. — Troisième plate-forme.

La partie inférieure de la troisième plate-forme ne comporte aucun changement, sauf que dans les cloisons séparatives le bois est remplacé par du métal déployé.

La galerie supérieure, que M. Eiffel s'était jusqu'à présent réservée, est livrée au public. Son plancher a été consolidé en conséquence et le bois y a été remplacé par de la tôle.

---

(1) Les poids comparatifs de la 2e plate-forme sont les suivants :

1° *Pendant l'Exposition de 1889.*

Surface totale d'axe en axe des colonnes 1.145 m^2, déduction faite de 206 *m* pour vides des ascenseurs et escaliers :

DÉSIGNATION.	QUANTITÉS.	POIDS.	TOTAUX.
		kg.	*kg.*
Fers de la galerie	326 m^2	30	9.780
Couverture de la galerie	380	30	11.400
Mâts	52	70	36.40
Chéneau (50 *kg*) et garde-corps (50 *kg*) 4 × 30,85	147,4	100	14 740
Imprimerie du *Figaro*	»	»	30.000
Boulangerie Jacquet	»	»	15.000
Abris couverts, bars, water-closets et boutiques	244	100	24.400
Planchers de la galerie (bois 27 *kg* + asphalte 48 *kg* = 75 *kg*)	326	75	24.450
Planchers hourdés de la plate-forme (bois et asphalte 75 *kg* + hourdis Perrière 70 *kg* = 145 *kg*)	722	145	104.690
Planchers hourdés sous les constructions (parquets sur lambourdes 70 *kg* + hourdis 70 *kg* = 140 *kg*)	97	140	13.580
Fers et supports des réservoirs cylindriques, plus 90 m^3 d'eau	»	»	107.400
Poids total			359.080

2° *Après l'Exposition de 1889.*

Le plancher asphalté de la plate-forme fut remplacé par du béton Coignet pesant 130 *kg* le m^2, soit avec le hourdis 200 *kg*. L'augmentation du poids est de 200 — 145 = 55 *kg* par m^2, soit au total 722 × 55 = 39.700 *kg*, laquelle a été à peu près exactement compensée par la suppression de la boulangerie et de quelques boutiques, ainsi que par la réduction de l'imprimerie du *Figaro* transformée en bar. On peut donc admettre le même poids de 359 *t*.

3° *Pendant l'Exposition de 1900.*

Surface nouvelle d'axe en axe des garde-corps 1.501 m^2, déduction faite de 142 m^2 pour vides des ascenseurs et escaliers.

DÉSIGNATION.	QUANTITÉS.	POIDS.	TOTAUX.
		kg.	*kg.*
Dallage général en ciment pesant : dalles 70 *kg* + bois 5 *kg* = 75	150,1	75	112.575
Chéneau et garde-corps 4 × 40,85	163,4	100	16.340
Pavillon central (fer, bois et remplissages)	»	»	54.000
Réservoirs de 30 m^3 dans la partie centrale	»	»	33.000
Fers nouveaux (galerie inférieure et consoles 56.808 *kg* + terrasse, garde-corps et escaliers 91.500 *kg*)	»	»	148.308
Poids total			364.223

La légère augmentation de 5 *t* est plus que compensée par la suppression des fers des anciens ascenseurs Otis, dépassant la plate-forme, et par celle de quelques conduites. On peut donc admettre que les poids comparatifs sont égaux.

La distribution est modifiée pour donner accès à l'impériale surmontant la cabine de l'ascenseur vertical. En outre, quelques boutiques ont été installées sur le pourtour, et les façades ont reçu une décoration nouvelle, en remplaçant autant que possible le bois par du métal déployé hourdé, de manière à écarter toute chances d'incendie.

L'ensemble de ces dispositions est représenté dans les figures 6, 7 et 12 à 15 de la planche XLVI.

Enfin, il a été installé au-dessus des grandes poutres en croix du campanile un petit pavillon réservé à M. Eiffel. Ce pavillon vitré est en tôle et de forme hexagonale ; il a 5 *m* de largeur et 2,12 *m* de côté. On y accède par un escalier partant de la galerie supérieure.

Ce pavillon est représenté figures 9 à 11, planche XLVI.

CHAPITRE II

DISPOSITIONS GÉNÉRALES DES ASCENSEURS ET ESCALIERS

§ 1. — Dispositions antérieures.

En vue d'augmenter pour l'Exposition de 1900 le nombre des voyageurs montés aux différentes plates-formes, la Société de la Tour décida de modifier complètement le système des ascenseurs accédant au premier et au deuxième étage.

Avant d'indiquer ces modifications, nous rappellerons d'abord quel était en 1889 le rendement pratique en voyageurs, montés par les divers ascenseurs de la Tour.

1° *Ascenseurs Otis.* — Pendant la majeure partie de l'Exposition, l'un des ascenseurs Otis faisait le service direct du sol au deuxième étage, pouvant ainsi élever par heure, à raison de 9 voyages et de 42 voyageurs, 378 personnes, soit 3.780 dans la journée de 10 heures.

L'autre ascenseur faisait le service du premier au deuxième et élevait, pendant la journée de 10 heures, à raison de 12 voyages de 42 personnes à l'heure, 5.040 voyageurs de l'un à l'autre étage.

Dans ces conditions, le nombre de voyageurs transportés dans la journée de 10 heures du sol au deuxième était :

Par le service direct du sol au deuxième. . . .	3.780 personnes.
— du premier au deuxième.	5.040 —
Soit en nombre rond.	9.000 personnes.

(Avec un service organisé de manière que l'un des Otis allât du sol au deuxième avec arrêt au premier pour y échanger des voyageurs, il n'effectuait plus que 7 voyages à l'heure, et le nombre des voyageurs était de $7 \times 42 \times 10 = 3.000$, soit du sol au premier, soit du premier au deuxième ; ce mode d'exploitation était moins avantageux.)

En résumé, les ascenseurs Otis pouvaient élever à la deuxième plate-forme un maximum de 9.000 voyageurs par journée de 10 heures.

2° *Ascenseurs Combaluzier.* — Chacun de ces ascenseurs spécialement affectés au service du sol au premier étage pouvait élever entre ces deux niveaux, à raison de 10 voyages à l'heure et de 90 voyageurs par ascension, un nombre de 9.000 personnes pendant la journée de 10 heures, soit 18.000 pour les deux appareils du même système.

3° *Ascenseur vertical.* — Le rendement pratique par heure de cet ascenseur, faisant le service du deuxième au troisième, comprenait 7 voyages de 65 personnes, soit au plus 4.550 voyageurs montés en 10 heures.

4° *Rendement total.* — Le nombre de voyageurs montés aux diverses plates-formes et les recettes correspondantes, d'après le tarif normal, étaient les suivantes :

A la première plate-forme	(ascenseur Combaluzier).	18.000 à 2 *fr.*	= 36.000 *fr.*
— deuxième —	(ascenseur Otis direct).	3.800 à 3 »	= 11.400 »
— deuxième —	(— du premier au deuxième)	5.000 à 1 »	= 5.000 »
— troisième —	(ascenseur Édoux).	4.550 à 2 »	= 9.100 »
	Total		61.500 *fr.*

Ce tableau peut être mis sous une autre forme en considérant le nombre de voyageurs s'arrêtant à chacun des étages.

Voyageurs s'arrêtant à la	première plate-forme. . . .	13.000 à 2 *fr.*	= 26.000 *fr.*
—	deuxième —	4.250 à 3 »	= 12.750 »
—	troisième —	4.550 à 5 »	= 22.750 »
	Totaux	21.800	61.500 *fr.*

Cette recette a été à peu près réalisée le 9 septembre qui a produit un chiffre de 60.756 *fr*, escaliers compris. Le nombre maximum de visiteurs a été de 23.202 le 10 juin (lundi de la Pentecôte).

§ 2. — Dispositions nouvelles.

Les transformations que l'on projette et qui sont en cours d'exécution, pour l'Exposition de 1900, sont les suivantes :

1° *Service du premier et du deuxième étage.* — Les deux ascenseurs du système Roux, Combaluzier et Lepape sont remplacés, aux piliers Est et Ouest, par deux ascenseurs à grande puissance, construits par la Compagnie de Fives-Lille pour le service du premier et du deuxième étage.

Ces ascenseurs permettront, avec arrêt au premier, d'effectuer 10 voyages à l'heure, en élevant par voyage 100 personnes au minimum, dont la moitié effectuera directement le voyage à la deuxième plate-forme et l'autre moitié s'arrêtera au premier pour remonter à la deuxième plate-forme à un voyage suivant; c'est-à-dire que si les cabines étaient toujours pleines, le nombre des voyageurs montés au deuxième serait de 20.000 avec ou sans arrêt, et la recette totale, avec le tarif normal de 3 *fr*, s'élèverait à 60.000 *fr*.

En outre, l'ascenseur Otis installé dans le pilier Nord ne fera plus que le service du sol au premier. Il est transformé de manière que sa vitesse permette d'effectuer 14 voyages à l'heure à raison de 80 voyageurs, ce qui permet de transporter en 10 heures $14 \times 80 \times 10 = 11.200$ personnes, lesquelles, au tarif de 2 *fr*, donnent lieu à une recette de 22.400 *fr*.

Le chiffre de la recette pour les trois ascenseurs est donc au total de $60.000 + 22.000 = 82.400$ *fr*.

Ce chiffre, comparé à celui de $36.000 + 11.400 + 5.000 = 52.400$ *fr*, donne une augmentation par jour de 30.000 *fr*, soit 57 p. 100.

Ces chiffres sont la mesure de l'augmentation du rendement possible des nouveaux ascenseurs pour le premier et le deuxième étage.

L'ascenseur du pilier Sud est supprimé et à sa place est installé un large escalier servant à effectuer les descentes du premier au sol; les deux escaliers existant aux piles Est et Ouest seront uniquement affectés à la montée, et ce service sera ainsi doublé relativement à ce qui existait en 1889. En outre, les quatre petits escaliers en hélice, allant du premier au deuxième et dont l'usage était fort incommode, seront remplacés par un large escalier unique situé dans la pile Sud en prolongement de l'escalier nouveau.

Le rendement de ces escaliers peut être très important. Les escaliers existants ont souvent livré passage à 1.500 personnes à l'heure. Les nouveaux pourraient donc donner 3.000 personnes à l'heure à la première plate-forme et 1.500 à la seconde. Mais ces maxima ne peuvent se réaliser que pendant quelques heures de l'après-midi, pendant les jours de grande affluence. Nous ne pouvons les faire entrer dans nos calculs que pour compléter les débits maxima des ascenseurs que nous avons indiqués plus haut.

2° *Service du deuxième au troisième.* — L'ascenseur vertical ne reçoit pas de modifications essentielles. On se contente pour le service courant de la journée de le munir d'une impériale découverte pouvant recevoir 25 personnes. La cabine elle-même ne recevra plus que 55 personnes, soit en tout 80; c'était ce nombre qui était parfois admis, mais avec un empilement de voyageurs très inconfortable et donnant lieu à de grandes lenteurs pour l'entrée et la sortie. En les répartissant autrement, il y aura tout avantage et le voyage sera plus agréable et plus rapide. Pendant les premiers et les derniers voyages, alors que les cabines montantes et descendantes sont insuffisamment équilibrées, l'accès à l'impériale sera supprimé et le nombre des voyageurs

par cabine n'excédera pas 60. Avec quelques modifications de détail dans la distribution qui sera améliorée de manière à diminuer les pertes de charge et à augmenter la vitesse, et dans les portes qui seront élargies, on peut espérer réaliser 10 voyages à l'heure. On monterait ainsi en 10 heures, si l'on n'est pas gêné par l'encombrement, un nombre de $80 \times 10 \times 10 = 8.000$ voyageurs, donnant une recette nouvelle de $8.000 \times 2 = 16.000$ *fr*, lesquels, ajoutés à la recette précédente de 82.000 *fr*, procureraient une recette totale de 98.400 *fr*.

Ce chiffre, comparé à celui de 61.500 *fr* pour l'ancienne installation, donne un supplément journalier de recettes de 36.900 *fr*, soit 60 p. 100. Ces chiffres sont la mesure de l'avantage procuré par la nouvelle installation des ascenseurs.

Le tableau comparatif par rapport à l'ancienne installation s'établit comme suit :

DÉSIGNATION.	TARIF NORMAL.	INSTALLATION DE 1889.		INSTALLATION DE 1900.	
		NOMBRE DE VOYAGEURS.	PRODUIT.	NOMBRE DE VOYAGEURS.	PRODUIT.
Voyageurs s'arrêtant à la première plate-forme.....	2,00	13.000	26.000	11.200	22.400
— à la deuxième —	3,00	4.250	12.750	12.000	36.000
— à la troisième —	5,00	4.550	22.750	8.000	40.000
Totaux.....		21.800	61.500	31.200	98.400

C'est dans l'idée que la deuxième plate-forme sera par elle-même trois frois plus fréquentée qu'en 1889 que sa surface a été beaucoup accrue et désencombrée.

Nous allons maintenant examiner en détail, au point de vue mécanique, les modifications introduites dans les nouveaux ascenseurs.

Nous commencerons par les ascenseurs étudiés par la Compagnie de Fives-Lille, à laquelle nous emprunterons, pour la majeure partie de cette description, les notes mêmes que cette Compagnie a remises à la Société de la Tour, et qui sont l'œuvre de ses ingénieurs, MM. Bassères et Ribourt.

CHAPITRE III

ASCENSEURS SYSTÈME FIVES-LILLE

§ 1. — Dispositions générales.

Les ascenseurs dont l'exécution a été confiée à la Compagnie de Fives-Lille par la Société de la Tour Eiffel, pour fonctionner en 1900, sont destinés au service de la première et de la deuxième plate-forme de la Tour et doivent assurer un trafic de 20.000 personnes par jour tant à la montée qu'à la descente.

Ces deux ascenseurs, installés dans les piliers Est et Ouest, sont indépendants l'un de l'autre et leurs moteurs sont des presses hydrauliques alimentées par des pompes placées dans la salle des machines du pilier Sud de la Tour.

Le véhicule projeté pour ces ascenseurs est composé d'un châssis de roulement portant deux cabines pouvant contenir chacune 50 voyageurs, en outre du poste des conducteurs; ce véhicule pèse à vide 9.500 *kg* et avec les 100 voyageurs 16.500 *kg*.

Un mécanisme à vis tangente produit le redressement des cabines pendant le parcours, en raison des variations d'inclinaison de la voie, de manière à en maintenir le plancher horizontal.

La voie de roulement est appliquée sur les poutrages faisant déjà partie de l'ossature de la Tour ; elle comporte, en outre des deux rails proprement dits, deux poutrelles en acier dont les ailes sont découpées en forme de crémaillères à denture allongée destinées à servir à l'occasion de points d'appui aux griffes d'un puissant parachute porté par le véhicule.

Le châssis porteur est suspendu par six câbles en acier partagés en deux groupes latéraux de trois câbles qui passent sur des poulies de renvoi, dont les principales, situées au deuxième étage, ont 4 *m* de diamètre et sont à trois gorges indépendantes.

Les câbles renvoyés jusqu'au pied de la Tour viennent se moufler sur des systèmes de poulies constituant, avec des presses hydrauliques horizontales, l'appareil moteur.

Les brins morts des câbles sont retenus par un système de palonniers hydrauliques assurant la répartition rigoureuse des charges, tout en laissant à chaque câble la faculté de s'allonger isolément. Les poulies sont à triples gorges indépendantes, dans le même but.

Ces câbles en fil d'acier à haute résistance offrent une sécurité considérable; chacun d'eux correspond en effet à 45 tonnes de rupture, c'est-à-dire qu'un seul des six câbles peut largement supporter le véhicule en pleine charge. Les poulies de mouflage ayant 3 *m* de diamètre, l'enroulement ne donne lieu, en outre, qu'à de faibles surtensions d'incurvation dans les fils élémentaires qui ont 13 dixièmes de millimètre de diamètre chacun. Le nombre des fils est de 216 par câble.

Les appareils moteurs sont établis dans l'enclave des fondations du pilier, au pied du chemin de l'ascenseur, et sont prolongés en outre à l'intérieur de deux galeries couvertes débordant sous les jardins du Champ de Mars.

Ils comprennent deux presses hydrauliques jumelles horizontales, dont les pistons plongeurs en acier laminé ont 402 *mm* de diamètre et 16,50 *m* de course, agissant sur les trains des poulies mobiles du mouflage des câbles.

Pour produire la montée du véhicule, ces presses sont alimentées par deux accumulateurs à haute pression, contenant de l'eau à une pression de 52 *kg* par *cm²* environ; à la descente, elles refoulent le liquide dans un accumulateur à basse pression, à 18 *kg* de pression environ, récupérant ainsi l'énergie correspondante à la manœuvre du poids mort du véhicule.

Ces accumulateurs sont de dimensions considérables et les plus importants qui aient été construits jusqu'ici. Chacun d'eux représente une accumulation d'énergie de plus de *un million* de *kgm* environ.

Les appareils de distribution des presses motrices sont séparés en deux groupes, dont un pour les manœuvres à la montée et l'autre pour celles de la descente, afin de présenter une entière indépendance de leurs fonctions avec la plus grande somme de sécurité. Un câble de manœuvre en acier établi le long de la voie de roulement commande ces appareils au moyen de servo-moteurs, de telle sorte que la mise en marche est déterminée à la main par le conducteur posté sur le véhicule. Les ralentissements aux stations sont automatiques.

Pour satisfaire au programme imposé par la Société de la Tour, le véhicule doit effectuer le parcours aller et retour du sol au 2e étage, soit deux fois 130 *m* de trajet, en 2 minutes seulement; en comptant en outre une minute d'arrêt à chaque station pour l'embarquement et le débarquement simultanés des voyageurs, cela fait 6 minutes par voyage, soit 10 voyages à l'heure, correspondant bien pour chaque ascenseur à 10.000 personnes transportées par journée de 10 heures.

La puissance développée à la montée du véhicule par les accumulateurs à haute pression, qui doivent débiter 4.000 litres d'eau à 52 *kg* en une minute, est de 500 chevaux environ.

La récupération à la descente sous la pression de 18 *kg* correspond d'autre part à 200 chevaux environ.

Il suit de là, par différence, une puissance de 300 chevaux dépensée par le véhicule pendant sa marche effective; mais, comme cette énergie est répartie sur une durée qui représente 6 fois le temps utile, ce n'est plus seulement que *50 chevaux* qui restent à développer par les pompes d'alimentation en travail de compression hydraulique.

En majorant ce chiffre des coefficients ordinaires de rendement des moteurs à vapeur qui actionnent les pompes, on voit que le fonctionnement des deux ascenseurs sera facilement assuré par un moteur de *150 chevaux* seulement.

Le parachute du véhicule est constitué par des freins hydrauliques analogues à ceux employés dans le matériel d'artillerie pour le recul des canons sur leurs affûts.

A cet effet, quatre pistons de freins jumelés deux à deux sont disposés dans les longerons du châssis porteur des cabines; ils sont solidaires de griffes articulées s'abattant instantanément sur les crémaillères de la voie, dans les cas de perturbations dans le jeu de la suspension, ou en présence d'une accélération exagérée de vitesse à la descente; le véhicule devant ainsi s'arrêter de lui-même et sans choc après les 2,50 *m* de course des freins de sûreté dont l'action retardatrice est progressive.

Un dispositif spécial permet ensuite de descendre en toute sécurité, au moyen de ces mêmes freins agissant alors comme des vérins hydrauliques par l'intermédiaire de leurs pistons accrochés à la voie, suivant des courses partielles de 2,50 *m*, jusqu'à la station la plus voisine, sans plus rien emprunter à la suspension des câbles.

Enfin, les presses motrices et leurs appareils de distribution sont pourvus de moyens de sécurité tels qu'une irrégularité quelconque dans leur fonctionnement ou dans la répartition des charges sur les câbles de suspension détermine aussitôt l'arrêt automatique et complet de toute l'installation.

L'élaboration de cet important projet, qui n'a pas demandé moins de dix-huit mois d'études, est due aux ingénieurs de la Compagnie de Fives-Lille; l'exécution des appareils, dont quelques-uns sont de dimensions colossales et ont présenté de grandes difficultés matérielles dans leur réalisation, est l'œuvre des ateliers de cette Société; le montage sur place, très périlleux pour une grande part, a été opéré par le personnel spécial de la Société de la Tour.

Ces appareils font l'objet des planches XXXV à XLV. Nous nous y reporterons pour la description qui va suivre des organes principaux.

§ 2. — Organes principaux.

1° *Véhicule.* — Le véhicule (Pl. XLIII à XLV) comprend un châssis, et deux cabines reposant chacune sur un plancher mobile autour d'un axe d'articulation horizontal.

Deux bielles relient les planchers des cabines en formant un parallélogramme articulé. Un mécanisme de redressement maintient les planchers horizontaux pendant leur course sur le chemin du pilier de la Tour, dont l'inclinaison est variable. Le mouvement de redressement (Pl. XLIII) est obtenu par une bielle liée à un secteur à denture hélicoïdale, qui est entraîné par une vis tangente recevant elle-même le mouvement d'un pignon droit engrenant avec une crémaillère adaptée sur un des côtés de la voie du chemin, et régnant sur toute la longueur du sol au 2e étage.

Le pignon n'emprunte à la crémaillère qu'un appui insignifiant comparé aux efforts notables nécessaires pour maintenir les cabines en équilibre sur leurs axes d'articulation.

L'extrémité des câbles, divisés en deux groupes de trois, vient s'attacher sur le côté du châssis. Chaque câble, après avoir passé dans un écubier porté par le longeron, vient se terminer par une tête engagée dans une pièce conique, dont le sommet est tourné vers le haut du véhicule. La base de ce cône est en regard d'un disque métallique (fig. 1, Pl. XLIV) formant palette de butée, muni d'une tige qui s'applique sur un levier solidaire de l'arbre qui commande le déclenchement des freins de sûreté.

Il y a donc de chaque côté du châssis un groupe de trois attaches s'appliquant sur un disque. Chaque attache est constamment sollicitée, vers le bas du véhicule, par un puissant ressort qui prend appui d'une part sur une embase venue près du sommet du cône formant l'attache et d'autre part sur un point fixe du longeron. Dans le cas où un câble viendrait à mollir, le ressort pousserait l'attache en arrière, qui entraînerait la palette de butée.

Dans ce dernier mouvement, l'arbre tourne par son levier et déclenche le système des freins.

D'autre part, un régulateur centrifuge à boules avec un ressort convenablement réglé, relié par une transmission à engrenage à l'une des roues porteuses, peut aussi déclencher le même frein, si la vitesse de translation du véhicule dépasse une allure déterminée.

Un levier à main, à la portée du conducteur placé sur le chariot, donne aussi le moyen de déclencher ce frein en cas de danger imminent en dehors des deux causes ci-dessus.

Le frein de sûreté mis en action dans les conditions précédentes a pour effet d'accrocher le véhicule sur les dents d'une crémaillère double en acier, à longues divisions, établie le long de son chemin de roulement. Cet accrochage est entièrement indépendant de la suspension normale et ne l'immobilise qu'après un parcours suffisant pour que l'amortissement de la puissance vive acquise ne développe que des efforts peu importants ne pouvant, en aucun cas, endommager les pièces du châssis porteur.

Ce frein hydraulique comporte 4 cylindres appliqués par paires sous les poutres latérales des châssis porteurs des cabines.

Les pistons sont ajustés dans les cylindres et sont munis d'une garniture en cuir embouti logée dans la tête du cylindre.

Les pistons sont jumelés deux à deux par une tête commune guidée à l'intérieur du longeron. Sur cette tête est articulée une sorte de palette robuste armée de deux cornes ou griffes mobiles qui peuvent en s'abattant se mettre en prise avec les dents des crémaillères d'accrochage situées de part et d'autre du rail de la voie du véhicule.

Des agrafes fixées au châssis du véhicule et débordant au-dessous du corps des crémaillères de sûreté viennent s'opposer au soulèvement du véhicule sous l'action des palettes.

Un puissant ressort sollicite les palettes à s'abattre vers la denture de sûreté au moyen de leviers appliqués sur les griffes; mais, dans les conditions normales de la circulation du véhicule sur sa voie, un loquet de retenue les maintient relevées.

Survienne une des circonstances citées précédemment, où l'action du frein de sûreté soit nécessaire, le loquet de retenue est dégagé de ses liaisons soit avec les câbles de suspension, soit avec le régulateur centrifuge, soit avec le levier à main; les palettes des deux systèmes de frein s'abattent aussitôt sur les crémaillères, la charge entière du véhicule vient s'y appuyer en déterminant le mouvement de refoulement des pistons dans leur cylindre.

Ceux-ci, qui sont remplis de glycérine, opposent aux efforts développés la résistance à l'écoulement de ce liquide à travers des rainures de profondeur décroissante pratiquées dans les parois des cylindres, comme dans les freins de l'artillerie. Il en résulte un mouvement uniformément retardé du véhicule, sous

un effort constant supporté par les appareils de frein et la denture des crémaillères, et ce, jusqu'à l'immobilisation définitive.

Le liquide évacué par les pistons du parachute est dirigé vers un petit réservoir placé dans l'entretoise supérieure du châssis, d'où il peut être réintégré à nouveau dans les cylindres, dont la tête est en communication directe avec ce réservoir.

Après le fonctionnement du parachute, dans les conditions précitées, si les appareils moteurs et la suspension font défaut, on procède à l'opération dite du sauvetage du véhicule accroché sur la voie par les moyens suivants :

Deux conduites en acier de 25 *mm* de diamètre intérieur sont établies à poste fixe le long du chemin, du sol jusqu'au 2e étage. L'une d'elles est en communication directe avec l'accumulateur à basse pression, l'autre communique avec les accumulateurs à haute pression par l'intermédiaire d'un appareil multiplicateur différentiel.

Cet appareil (Pl. XLII) permet d'alimenter au besoin la conduite, même à la partie supérieure, avec une pression effective de 75 *kg* par cm^2, suffisante pour remonter le véhicule en pleine charge sur ses pistons de frein agissant comme des vérins.

Les deux conduites dites de sauvetage sont munies d'une série de robinets espacés de 11 *m*, permettant de les raccorder avec les freins, au moyen de tuyaux souples en acier de 15 *m* de longueur.

Un jeu de robinets à pointeau placé sur le véhicule au poste de manœuvre permet au conducteur de faire fonctionner en conséquence les freins pour cette manœuvre, en utilisant en outre quatre griffes d'accrochage placées deux par deux à l'extrémité inférieure de chaque longeron.

Au moment où les pistons des freins arrivent à fond de course, et par conséquent lorsque le véhicule est arrêté, les griffes fixes des longerons sont descendues à la main par une manivelle dans les crans des crémaillères latérales, de telle sorte que ce sont ces nouveaux points d'appui qui reçoivent finalement le véhicule quand on a fait descendre un peu celui-ci, pour amener les griffes fixes au fond des dents.

Dans ces conditions, il devient possible de dégager, par un mouvement arrière du véhicule, les premières palettes de la denture des crémaillères et de les relever, pour armer les pistons des freins. Pour cela, on introduit de l'eau en pression dans les cylindres avec le multiplicateur de pression.

Une fois ces pistons armés à nouveau, si on remet leurs palettes en prise avec les crémaillères, on dégage les griffes fixes et le véhicule peut alors franchir sur ses freins une distance égale à leur course pour être reçu encore une fois sur les griffes fixes et ainsi de suite, ces manœuvres successives donnant la faculté de gagner la plus prochaine station, sans réclamer aucun secours de la part de la suspension ordinaire.

Les caisses des cabines, au nombre de deux, auxquelles il importait de donner la plus grande légèreté possible, sont construites avec des profilés spéciaux en aluminium, sur lesquels est fixée une tôle mince du même métal.

Le poste de manœuvre est placé sous la cabine inférieure, et est attaché à l'entretoise dans laquelle sont logés les mécanismes du redressement et ceux de déclenchement des griffes du frein. Dans ce poste, on trouve le volant de manœuvre, servant à mettre en mouvement le véhicule, soit pour la montée, soit pour la descente, au moyen d'un câble sans fin mû dans un sens ou dans l'autre par un mécanisme de poulies et de crémaillères portées par un avant-bec du poste. Ce mécanisme est semblable à celui qui est installé sur les ascenseurs du système Otis. Le câble sans fin transmet le mouvement aux organes de distribution placés dans le sous-sol de la pile. Ce câble en acier a un diamètre de 12 *mm*.

2° *Câbles.* — Les deux groupes de 3 câbles de suspension sont actionnés chacun par les appareils hydrauliques moteurs placés à la base du pilier de la Tour, au pied du chemin. Les câbles passent au sommet du parcours sur deux poulies de renvoi de 4 *m* de diamètre, dont la jante est divisée en 3 gorges indépendantes.

D'autres poulies guident les câbles le long du chemin à peu près parallèlement aux voies de roulement.

Ces câbles, comme on l'a vu, offrent une très grande sécurité. Ils ont été fabriqués par la Société des Ardoisières d'Angers.

Nous donnons ci-dessous les conditions principales relatives à la fabrication et à la fourniture de ces câbles.

ARTICLE PREMIER.

Importance de la fourniture. — La fourniture comprend pour les deux ascenseurs semblables à établir dans les piliers Ouest et Est de la Tour :

Une longueur totale de 6.000 *m* de câbles, divisée en 12 longueurs égales de 500 *m* chaque, d'un seul tenant sans raccord ni épissure. Ces longueurs comprennent environ 6 *m* supplémentaires, pour chaque câble, en vue des éprouvettes à prélever lors de la réception.

ARTICLE II.

Composition du câble. — L'ensemble de la fourniture est d'un type unique de câble, composé comme suit :

216 fils élémentaires de 13 dixièmes de millimètre de diamètre, câblés en 6 torons de 36 fils chacun, à triple enveloppe (6 + 12 + 18), avec âme des torons en chanvre et âme principale du câble en chanvre également. Section d'un fil : 1,327 mm^2. Section métallique du câble : 286,6 mm^2.

Diamètre extérieur du câble fini : 27,5 *mm*.

Poids par mètre de longueur du câble fini : 2,50 *kg*.

ARTICLE III.

Qualité et résistance. — Les fils élémentaires, en acier clair, dits à grande résistance, devront présenter avant câblage une résistance de 150 à 160 *kg* par millimètre carré de section pour la rupture, avec 1 à 1,5 p. 100 d'allongement.

Ces fils devront pouvoir résister à 50 pliages successifs à 180°, sur des mâchoires arrondies de 10 *mm* de rayon.

Après câblage, la résistance totale à la rupture du câble sera de 37.000 *kg* au minimum.

L'essai de rupture sera fait sur des bouts de 3,00 *m* de longueur environ, prélevés sur les câbles livrés finis (en présence du réceptionnaire) et à chaque extrémité, c'est-à-dire à raison de deux éprouvettes par longueur de câble fourni.

ARTICLE IV.

Tolérance. — Les prescriptions précédentes sont susceptibles des tolérances suivantes :

1° 1/2 *mm* en plus ou en moins sur le diamètre des câbles finis.

2° 2 p. 100 en plus ou en moins sur le poids.

ARTICLE V.

Condition générale de fabrication. — Le chanvre employé pour les âmes sera de toute première qualité.

Les fils élémentaires en acier auront tous au minimum, avant câblage, la longueur correspondante à celle du câble à fabriquer, sans joints ni soudures.

Ils devront présenter rigoureusement le même diamètre de 13 dixièmes de millimètre sur toute leur longueur. Leur surface ne devra présenter ni manque de matières, ni criques, ni défauts d'aucune sorte.

Ils devront tous présenter des propriétés identiques de *résistance*, d'*élasticité* et de *flexibilité* ; toute dérogation à cette clause particulière fera rebuter l'élément qui présenterait une différence avec les autres.

A cet effet, des échantillons de tous les fils élémentaires de chaque câble seront soumis aux essais de traction et de pliage dont les conditions numériques sont définies ci-dessus à l'article III.

Le câblage devra être particulièrement soigné, les fils bien serrés les uns contre les autres et l'enroulement des torons parfaitement régulier.

Un échantillon du type de câble sera fourni avant de commencer la fabrication, à titre de vérification de la composition adoptée.

(Conformément aux clauses de ce cahier des charges, les essais ont été faits à Angers, à l'usine, en présence de l'ingénieur de la Société de la Tour, du gérant de la Commission des Ardoisières et du contrôleur de la Compagnie de Fives-Lille.

Les essais à la traction ont été exécutés d'abord sur les fils élémentaires et ensuite sur le câble fini.

Les essais partiels de fils élémentaires ont donné entre 180 et 200 *kg* de résistance par millimètre carré. Quant à la malléabilité de l'acier employé, les ployages des fils, qui ont dépassé le chiffre de 100 pour un grand nombre d'échantillons, montrent que cette qualité est largement réalisée, le cahier des charges indiquant 50 ployages seulement comme limite inférieure.

Les résultats obtenus pour les câbles finis dépassent aussi les chiffres stipulés au cahier des charges. Les essais ont été faits sur des éprouvettes de 1 *m* de longueur, et sous des charges variant de 5 en 5 *t*, depuis 20.000 *kg* jusqu'à la charge de rupture. La rupture a eu lieu jusqu'à 47 *t* pour plusieurs échantillons : soit à 164 *kg* par millimètre carré. Elle s'est faite en moyenne sous la charge de 45 *t*, qui correspond à 157 *kg* par millimètre carré.

Quant à l'allongement pour 100, il a varié de 0,4 à 1 pour une charge de 20.000 *kg* et de 1,0 à 2,7 pour la charge de rupture.)

Il résulte des chiffres précédents que l'on a complète sécurité au point de vue de la suspension du véhicule.

En effet, ce dernier en charge exerce une traction maximum sur le brin mort de 15 *t* environ, soit 2.500 *kg* pour chacun des 6 câbles sur lesquels elle est répartie.

La section du câble étant de 286,6 mm^2, le travail à la traction correspondant est de $\frac{2.500}{286,6} = 8,7$ *kg*.

Si on ajoute à cette fatigue celle due à l'incurvation du câble sur les poulies de 3 *m* de diamètre et qui est :

$$20.000 \times \frac{3.000}{1,3} = 8,66 \text{ } kg,$$

on arrive à un total de 17,36 *kg* par millimètre carré, qui correspond environ au 1/9 du travail de rupture que nous avons vu être de 157 *kg*.

3° *Presses motrices.* — Chaque ascenseur est mis en mouvement par deux presses hydrauliques horizontales (voir Pl. XXXV à XXXVII) de 17,542 *m* de longueur et de 420 *mm* de diamètre intérieur, reposant sur des massifs en maçonnerie surélevés. Le cylindre de presse est formé de trois tronçons, et il est muni d'une culasse dans laquelle se fait l'arrivée de l'eau, et d'une tête portant une garniture étanche en bronze, avec cuir embouti.

Sur la culasse sont disposées une soupape de sûreté, en cas de rupture de la conduite, et une autre soupape limitant la course du plongeur. La tête porte deux verrous qui limitent également la course du plongeur (voir Pl. XXXIX).

Les assemblages des tronçons du cylindre servent en même temps, au moyen de leur garniture en bronze, de supports intérieurs pour le plongeur construit entièrement en acier laminé. Le plongeur creux a 402 *mm* de diamètre et 18,34 *m* de longueur totale. Il est maintenu constamment plein d'eau en pression à l'aide d'un petit orifice pratiqué dans sa culasse.

La tête de ce piston est reliée à un chariot mobile porté par quatre galets qui roulent sur une voie spé-

ciale aménagée dans une galerie souterraine maçonnée. Après sa sortie du cylindre, ce piston vient s'appuyer sur une série de supports disposés dans la galerie, de manière à éviter toute flexion.

Le chariot (voir Pl. XLI) porte quatre poulies mobiles de mouflage de 3 *m* de diamètre à trois gorges indépendantes. Trois autres poulies identiques, mais fixes, sont montées sur la culasse de la presse.

Les deux groupes de 3 câbles venant du véhicule et correspondant chacun à l'une des presses sont mouflés huit fois sur ces poulies, de sorte que la course nécessaire pour les pistons est égale au 1/8 de celle du véhicule. Cette dernière est de 128,61 *m*, dont 68,41 *m* du sol au premier étage et 60,20 *m* du premier au deuxième. La course utile des pistons plongeurs est donc de 16,076 *m*.

L'extrémité fixe des câbles est rattachée, pour chaque groupe, à un système de trois tendeurs hydrauliques, soit un pour chaque câble, communiquant entre eux pour assurer la répartition rigoureuse des charges tout en laissant à chaque câble la facilité de s'allonger isolément. Chaque tendeur est constitué par un corps cylindrique dans lequel est logé un piston muni d'une tige. C'est sur cette tige qu'est attachée l'extrémité du brin mort (Voir Pl. XLI).

4° *Accumulateurs*. — L'eau en pression qui agit sur les pistons plongeurs des presses motrices vient de deux accumulateurs à haute pression, dans lesquels elle est refoulée par une pompe placée dans la salle des machines du pilier Sud. L'aspiration de cette pompe s'opère dans un accumulateur à basse pression placé à côté des deux autres. La charge effective de refoulement de la pompe correspond ainsi à une colonne d'eau, mesurée par la différence de pression entre les deux sortes d'accumulateurs.

Les trois accumulateurs (voir Pl. XXXVIII) sont entièrement construits en fonte. Ils ont une course totale commune de 5,50 *m*, un diamètre de piston de 0,70 *m* pour la haute pression et de 1,10 *m* pour la basse pression.

Chaque accumulateur repose sur un socle en fonte d'une seule pièce, de 3,50 *m* de diamètre.

Les cylindres et les pistons des accumulateurs à haute pression sont d'une seule pièce : ceux de la basse pression sont en deux pièces.

Le lest, dont le poids s'ajoute à celui des parties mobiles constitutives de ces accumulateurs, est de 166 tonnes pour chacun des accumulateurs à haute pression et de 138,6 tonnes pour l'accumulateur à basse pression. Il est contenu dans une caisse en tôle annulaire de 3,50 *m* de diamètre reposant sur un tourteau inférieur en fonte suspendu par de solides boulons au chapeau qui est fixé à la tête du plongeur. Ce lest est formé par des gueuses de fonte dont les intervalles sont remplis par du sable.

Chacun des accumulateurs est muni d'une soupape parachute, en cas d'une rupture de conduite, et en outre d'un robinet d'arrêt, servant à l'isoler de la machine proprement dite (Voir Pl. XXXVIII).

5° *Appareils de distribution*. — Les deux presses hydrauliques motrices sont mises en communication avec les deux systèmes d'accumulateurs à haute et à basse pression, pour la montée ou la descente, au moyen de conduites raccordées sur des soupapes de mise en marche et d'arrêt qui sont ouvertes ou fermées à volonté, pendant la marche du véhicule sur le chemin (Voir *Sm* et *Sd*, Pl. XXXVI, et pour les détails Pl. XXXIX).

Ces soupapes, au nombre de deux, sont établies de manière à correspondre chacune au passage du liquide sous pression dans un seul sens, et leur ouverture, qui a lieu au moment de la mise en marche, soit pour monter, soit pour descendre, est progressive.

D'autre part, le véhicule ne prend sa pleine vitesse en dehors de l'action progressive de ces soupapes que par l'intervention d'autres appareils qui seront décrits plus loin : ce sont les régulateurs hydrauliques automatiques, étendant jusqu'à 5 *m* de parcours le ralentissement de vitesse du véhicule, depuis l'ouverture initiale de la soupape jusqu'à la pleine marche.

De même, avant l'arrêt aux trois stations de l'ascenseur, les régulateurs en question interviennent pour ralentir la vitesse du véhicule sur 5 *m* de trajet avant la fermeture totale de la soupape, soit à la montée, soit à la descente.

Ces fonctions sont automatiques et par conséquent d'une régularité certaine.

Quant à l'arrêt du véhicule marchant à pleine vitesse, entre deux stations consécutives, il peut être produit par l'intervention de son conducteur : mais ce mode d'arrêt ne comportant pas alors de ralentissement automatique préalable, le délai pour le produire dépend évidemment de l'habileté du conducteur ; cela d'ailleurs est sans difficulté sérieuse Cette dernière faculté peut être utilisée plus particulièrement pour la visite des chemins et les opérations de graissage des divers appareils établis sur le parcours de

l'ascenseur, la vitesse de marche étant alors aussi faible que l'on veut, les soupapes n'étant ouvertes que d'une très petite quantité.

L'eau qui a passé dans les soupapes de mise en marche et le régulateur, avant d'arriver aux presses franchit un appareil dit *coupleur des presses*, qui a pour but d'égaliser les pressions sur la section des pistons moteurs, afin de rendre égale la marche de ces derniers et d'assurer ainsi une égale répartition de la charge sur les deux groupes des trois câbles (Voir M, Pl. XXXVI, et pour les détails Pl. XL).

a) *Soupapes d'arrêt et de mise en marche.* — Il y a deux soupapes de ce type, une pour la montée du véhicule fonctionnant ainsi à haute pression et une pour la descente, à basse pression. Leurs dispositions entièrement identiques sont les suivantes (Voir Pl. XXXIX) :

L'obturateur proprement dit, de forme circulaire, repose sur un siège en bronze dur à portée conique, avec une surface de contact très réduite et parfaitement rodée. Cet obturateur est relié en dessus et en dessous par des tiges articulées à deux pistons d'équilibre de même diamètre qui rendent ainsi ce système indépendant des pressions du liquide, sauf le frottement des garnitures en cuir embouti des deux pistons. Ce système est placé dans un corps cylindrique étanche muni de tubulures pour le raccordement avec la tuyauterie générale, le liquide à la pression la plus élevée étant mis en relation avec la capacité située au-dessus de l'obturateur. L'écoulement se produit ainsi, au moment de l'ouverture de la soupape, dans le sens du dessus au dessous de l'obturateur.

La face inférieure du disque de l'obturateur est découpée suivant six encoches de formes courbes concaves (Voir Pl. XXXIX) qui ne donnent la section maximum de passage qu'après une levée de 50 *mm* complète. A l'origine du soulèvement de l'obturateur, le liquide ne peut d'abord passer que par une véritable fissure circulaire entre le siège et le disque mobile, sur 1 ou 2 *mm* de hauteur, puis par les six encoches, qui ne présentent que des ouvertures segmentaires d'abord très faibles et s'agrandissant au fur et à mesure de la levée de la soupape.

Le soulèvement et la fermeture de cet obturateur sont produits dans deux sens opposés par un servo-moteur actionné du véhicule, comme on l'a vu, à l'aide du câble sans fin.

L'action du servo-moteur est transmise au mécanisme placé au-dessous du corps de la soupape actionnant le piston inférieur d'équilibre pour le soulever en surmontant l'effort dû à la pression de l'eau. A cet effet, un galet (Voir fig. 15, Pl. XXXIX), dont l'axe traverse le prolongement du piston inférieur, repose sur une came rectiligne, sorte de barre horizontale en forme de plan incliné, laquelle est reliée directement au servo-moteur par un axe horizontal.

La came s'appuie par sa partie rectiligne inférieure sur un galet porté par un troisième piston, faisant partie d'une petite presse logée dans le socle de la soupape. Cette presse étant toujours remplie d'eau en pression, le galet joue le rôle de point fixe, pour la came fonctionnant comme un coin. Quand le servo-moteur pousse la came, cette dernière soulève peu à peu le clapet obturateur par son plan incliné et ouvre la soupape.

Le mouvement rétrograde de la came produit, au contraire, la fermeture du clapet.

Le tiroir du servo-moteur est actionné par le câble de manœuvre à l'aide d'un système de leviers et de tringles. Ce tiroir n'est pas équilibré; il tend toujours à produire la fermeture du clapet de la soupape de marche.

Comme dispositif de sécurité dans le cas du mollissement ou de la rupture d'un ou de plusieurs câbles, des soupapes de sûreté mettent à l'évacuation la presse logée dans le socle de la soupape de mise en marche; à ce moment, ce piston de presse s'abaisse avec le galet d'appui, et le clapet descend sur son siège.

Ces soupapes de sûreté (Pl. XLII) sont placées à la tête des tendeurs de câbles et sur le coupleur.

Tout arrêt accidentel du véhicule, toute rupture des câbles ou marche anormale des presses, entraînent leur fonctionnement et, par suite, la fermeture des soupapes de mise en marche.

En vue de la commande directe des manœuvres de l'ascenseur à faible vitesse, les soupapes d'arrêt et de mise en marche peuvent encore se manœuvrer d'en bas indépendamment des mécanismes décrits ci-dessus; on agit pour cela directement sur leur obturateur pour le soulever à l'aide d'un écrou vissé sur la partie supérieure de la tige principale, au-dessus du piston supérieur.

Cette manœuvre peut ainsi être opérée au pied de l'ascenseur à poste fixe et en l'absence de tout

conducteur placé sur le véhicule, ce qui donne les moyens d'opérer dans l'appareil toutes les vérifications désirables avec une entière sécurité; l'ouverture réglée à la main peut être aussi faible et la marche générale extrêmement lente.

b. — *Régulateurs automatiques de vitesse des presses motrices.* — Ces appareils, au nombre de deux, sont annexés chacun spécialement à l'une des soupapes d'arrêt décrites précédemment, pour régler le débit du liquide passant : soit de l'accumulateur à haute pression aux presses motrices, soit inversement de ces presses à l'accumulateur à basse pression, afin d'obtenir pour les pistons reliés aux câbles du véhicule une vitesse constante quels que soient les efforts de traction qu'ils produisent sur leur mouflage (Voir *Rm* et *Rd*, Pl. XXXVI, et pour les détails Pl. XL).

Toutes les dispositions de ces deux régulateurs sont identiques et le jeu en est basé sur le principe suivant : ouvrir automatiquement au liquide qui les franchit sous une chute de pression essentiellement variable, des orifices de section proportionnée et par conséquent variables aussi, par l'antagonisme d'un ressort et d'un piston actionné par le liquide à pression variable.

La loi de variation des orifices régulateurs en fonction des pressions du liquide actionnant les pistons moteurs doit être telle que le débit soit rigoureusement constant, les pressions dans les accumulateurs de réserve étant d'autre part également constantes.

De plus, pour ralentir la marche du véhicule aux approches des stations, à la mise en marche ou à l'arrivée, les orifices en question sont susceptibles d'une diminution des 4/5 de leur ouverture normale, aux points correspondants de la course des pistons moteurs, par l'intervention d'un mécanisme spécial agissant sur ces régulateurs, mais sans modifier pour cela les conditions dynamiques de la régularisation.

I. *Régulateur de vitesse à la montée.* — Cet appareil (Pl. XL) se compose d'un obturateur circulaire en bronze, mobile à l'intérieur d'un cylindre fixe en bronze également, contre lequel il est exactement rodé. Les surfaces de ces deux cylindres sont découpées suivant des ouvertures réparties sur la circonférence pour équilibrer les pressions du liquide et qui peuvent produire, par la superposition des orifices mobiles avec les orifices fixes, certaines combinaisons réglées. C'est par la translation longitudinale de l'obturateur mobile ou par sa rotation angulaire que cette superposition forme des ouvertures de sections variables par lesquelles le liquide s'écoule avec un débit rigoureusement déterminé, et d'une manière automatique.

Pour cela, l'obturateur cylindrique mobile, entièrement ouvert à ses deux extrémités, porte un moyeu relié par des ailettes à sa circonférence; une tige fixée à ce moyeu et prolongée à la partie supérieure de l'appareil forme le piston de réglage appelé à déterminer les positions des orifices mobiles sur les orifices fixes.

Cet ensemble est logé dans un corps cylindrique étanche muni à sa partie inférieure d'une tubulure en communication permanente avec les deux presses motrices de l'ascenseur par l'intermédiaire du coupleur.

Le piston, porté à l'extérieur par la tige de l'obturateur sur sa face supérieure, peut recevoir l'action de l'eau en pression, qui lui est fournie par un servo-moteur qui actionne un tiroir de distribution. Ce servo-moteur met la face supérieure du piston en communication avec la pression ou avec l'évacuation. Dans le premier cas, le piston s'abaisse; dans le deuxième, il se relève, par suite de la pression agissant sur la tige de l'obturateur. Dans l'un et l'autre cas, l'obturateur suit le mouvement du piston auquel il est lié.

Le servo-moteur fonctionne automatiquement, au moyen d'une petite presse hydraulique, ou balance régulatrice, dont le plongeur subit toutes les variations de pression qui ont lieu dans le corps du régulateur. La balance régulatrice subit l'action antagoniste d'une pile de rondelles Belleville. Le plongeur vertical de la balance et son corps de presse sont montés sur le couvercle du régulateur. Tout mouvement vertical de ce plongeur est transmis dans le même sens au piston antagoniste de l'obturateur. L'ascension de ce dernier correspond donc à une augmentation de pression dans le régulateur, ayant produit la levée du petit plongeur et l'évacuation de l'eau située au-dessus du piston antagoniste. L'obturateur suit donc tous les mouvements du petit plongeur. L'équilibre s'établit lorsque, le servo-moteur étant dans sa position normale, l'eau du régulateur agit sur la tige de bas en haut, tandis que l'eau emprisonnée au-dessus du piston antagoniste s'oppose à tout mouvement.

Autour du cylindre fixe en bronze concentrique à l'obturateur mobile se trouve une capacité annulaire dans aquelle débouchent les orifices qui y sont découpés; elle est munie d'une tubulure qui communique

avec la soupape d'arrêt et de mise en marche pour la montée, recevant elle-même le liquide fourni par l'accumulateur à haute pression.

On conçoit alors que, les orifices découpés dans la paroi mobile ayant aux différents points de leur hauteur des sections différentes, leur superposition avec les orifices fixes peut donner, au fur et à mesure du déplacement longitudinal de l'obturateur, des sections conformes à une loi déterminée pour réaliser un débit constant quel que soit l'écart des pressions sous lequel l'écoulement du liquide se produit au passage de ces ouvertures.

Lorsque le chargement du véhicule est minimum, et que, par suite, l'écart de pression augmente entre l'accumulateur et les presses motrices, le piston plongeur descend, et il en est de même de l'obturateur et de son piston, ce dernier recevant alors l'action de l'eau en pression. Dans ce cas, les orifices diminuent de section par le déplacement relatif des parois cylindriques ajourées; lorsque, au contraire, la charge du véhicule devient maxima, l'écart de pression diminue, la presse antagoniste est mise à l'évacuation et l'obturateur est poussé de bas en haut, la section des orifices augmente pour maintenir le débit constant.

Pendant la marche normale de l'ascenseur, tous les orifices pratiqués autour de l'obturateur livrent simultanément passage au liquide.

Ralentissement automatique. — Au moment où le ralentissement du véhicule doit se produire, l'obturateur subit une rotation sur lui-même d'une amplitude de 30°, ce qui aveugle les neuf dixièmes des orifices et ne laisse de passage libre que sur le dixième restant, sans modifier pourtant la situation en hauteur ni les conditions d'équilibre de la partie mobile du système. Le débit du liquide alimentant les presses est ainsi réduit à peu près dans la même proportion et la vitesse de marche devient aussi environ le dixième de la vitesse à plein débit.

Cette rotation angulaire de l'obturateur est déterminée au moyen d'un grand tambour denté dont le développement est égal au 1/25e de la course du véhicule. Ce tambour est muni à sa circonférence de deux cames correspondantes, la première à la station du premier et la deuxième à la station du sol et du deuxième étage. Dans la rotation du tambour, ces cames, qui font saillie, viennent abaisser la branche d'un levier qui ouvre le tiroir d'une petite presse hydraulique motrice. Cette presse, par une combinaison de bielles et de levier, fait tourner l'obturateur mobile.

Le tambour denté reçoit le mouvement d'un pignon, qui est en relation par des engrenages coniques avec la poulie de renvoi inférieure, placée sur le grand chevalet.

Quand le véhicule est au sol, la came qui correspond à cette station appuie sur la branche du levier de la petite presse motrice, et par suite l'obturateur est tourné et la plus grande partie de ses orifices est obturée. Mais au moment où le conducteur manœuvre pour ouvrir la soupape de mise en marche, l'eau franchit le régulateur à travers les orifices non aveuglés de l'obturateur et les pistons moteurs peuvent se mettre en marche. Le tambour denté tourne d'abord lentement, et bientôt la came du rez-de-chaussée échappe la branche du levier. A ce moment, l'obturateur tourne en sens contraire et tous ses orifices deviennent libres. L'eau trouvant une section de passage beaucoup plus grande, la vitesse des pistons moteurs croît jusqu'à sa valeur normale. Il en est ainsi jusqu'au moment où, le véhicule arrivant à 5 *m* au-dessous du premier étage, la came de cette station abaisse à nouveau la branche du levier, et où la petite presse referme à nouveau l'obturateur. L'arrêt complet est obtenu alors par le conducteur qui agit sur la soupape d'arrêt et de mise en marche, pour la fermer.

II. *Régulateur pour la descente.* — Les dispositions de cet appareil sont identiques à celles du précédent. Le corps principal est aussi en communication permanente avec les presses motrices et la capacité annulaire extérieure au cylindre fixe découpé est en relation avec la soupape d'arrêt et de mise en marche pour la descente, qui communique d'autre part avec l'accumulateur à basse pression.

Les orifices de l'obturateur mobile sont établis de manière à diminuer de section quand le piston monte par suite de l'évacuation de l'eau sur sa face supérieure; cela se produit pour le cas du maximum de chargement du véhicule, alors que l'écart de pression entre les presses motrices et l'accumulateur augmente; à l'inverse, l'obturateur descend et ouvre les orifices en grand, pour le minimum de chargement du véhicule. Le ralentissement aux abords des stations se produit comme pour l'appareil précédent.

c. — *Coupleur des presses motrices.* — L'eau qui sort du régulateur de vitesse, et qui se rend aux

presses, au moment de la montée, ou qui sort des presses pour aller au régulateur au moment de la descente, passe dans le *coupleur des presses motrices*, placé entre les deux appareils précédents.

Le coupleur, qui est un appareil commun à la montée et à la descente, a pour but d'égaliser les pressions sur les pistons moteurs. Il réduit l'arrivée de l'eau sur celui des deux pistons qui supporterait, à un moment donné, un effort supérieur à l'autre. Cet étranglement a lieu jusqu'à ce que l'égalité de pression soit établie sur les deux plongeurs.

Le coupleur (Pl. XL, fig. 49 à 54) comprend un équipage de deux pistons horizontaux, reliés entre eux par une tige rigide. Chacun d'eux glisse dans une chemise en bronze percée de fenêtres. En marche normale, les deux séries de fenêtres se trouvent placées entre les faces intérieures des deux pistons, où aboutit également l'eau en pression venant du régulateur.

L'équipage des pistons et les chemises sont contenus dans un corps en fonte étanche. Chacune des deux séries de fenêtres est située en regard d'un canal en forme de tore, venu de fonte dans le corps du coupleur. Chaque tore communique par une conduite supérieure avec l'une des presses motrices.

Les pistons horizontaux sont munis du côté de la partie extérieure d'un prolongement passant dans une garniture étanche, et qui reçoit l'action d'un ressort antagoniste, logé dans une capacité du corps en fonte. Cette capacité ou boîte à ressort est reliée par un petit tube avec la face antérieure des pistons des tendeurs hydrauliques des câbles. Elle est remplie d'eau une fois pour toutes, ainsi que la partie avant des cylindres tendeurs; la pression initiale de l'eau convenablement choisie assure la tension des câbles.

L'équipage des deux pistons du coupleur est donc normalement en équilibre.

Mais si l'on suppose une surtension dans l'un des deux groupes de câbles, celui de droite par exemple, cette surtension est transmise par les tendeurs de ce côté sur la face extérieure du piston de droite du coupleur. L'équipage se déplace alors sous cet effort, et le piston de droite vient obturer en partie les fenêtres correspondantes à la presse de droite, créant ainsi une perte de charge jusqu'à ce que l'équilibre soit rétabli sur les deux plongeurs des presses.

Dans le cas de la descente, l'eau arrive par les conduits en forme de tore, passe dans l'espace compris entre les deux pistons et rejoint ensuite le régulateur de vitesse pour la descente.

Le coupleur est muni, en outre, d'un organe de sécurité. C'est une soupape qui peut mettre à l'évacuation à un moment donné la presse de sûreté, logée dans le socle des soupapes de mise en marche.

La soupape de sûreté s'ouvre à l'évacuation au moyen d'une transmission prise sur une crémaillère de la tige qui relie les deux pistons du coupleur (voir détails fig. 8 à 11, Pl. XLII). Quand l'équipage se meut d'un côté, d'une façon anormale, la soupape de sûreté, au moyen de la transmission de mouvement, est mise à l'évacuation pour un déplacement donné de l'équipage, et provoque la fermeture de la soupape de mise en marche.

d) *Organes complémentaires de la distribution.* — Tous les organes que nous venons d'examiner sont reliés entre eux par une tuyauterie, partie en fonte de 200 *mm* et partie en acier de 150 *mm*. Celle venant de la pompe vers les accumulateurs à haute pression, ou allant de l'accumulateur à basse pression vers la pompe, est en acier. Sur chacune de ces deux conduites, se trouve un clapet d'isolement, qui fait obstacle au retour de l'eau, soit de la haute pression vers la pompe, soit de la pompe vers la basse pression (voir IHP et IBP, Pl. XXXVI, et détails Pl. XL, fig. 55 à 58 et 59 à 62).

La pompe employée est du système Worthington.

L'eau en pression qui actionne tous les servo-moteurs des organes de distribution et des soupapes de sûreté est filtrée dans une poche en fonte remplie d'éponges lavées (fig. 18 à 20, Pl. XLII). Les eaux d'évacuation provenant de ces manœuvres sont conduites dans un bac de décharge en tôle placé à la base du pilier (voir fig. 1, Pl. XXXVII).

Les trois soupapes de sûreté des tendeurs et du coupleur et les presses des soupapes de mise en marche communiquent toutes avec un appareil dit *pot de jonction* (voir L, Pl. XXXVI, et détails Pl. XLII, fig. 12 à 16) auquel aboutit l'eau en pression qui remplit ces organes. Le pot de jonction peut être mis à l'évacuation à la main, en manœuvrant le pointeau p'', ce qui entraîne, comme par une soupape de sûreté, la fermeture des soupapes de mise en marche. C'est donc un organe de sécurité à la main.

Pour compléter cette description, nous dirons un mot du *multiplicateur de pression* (voir V, Pl. XXVI, et détails Pl. XLII, fig. 24 à 34) placé dans la salle de l'ascenseur à côté des appareils ci-dessus. Il a pour but de fournir l'eau à une pression suffisante pour la remonter dans une petite conduite dite de sauvetage placée le long du chemin de l'ascenseur, et venir agir au moyen de raccords souples, dans les cylindres de frein du véhicule. Cette opération peut être nécessaire, dans le cas où le véhicule est arrêté sur son chemin, par suite du fonctionnement des freins, et où l'on veut faire la manœuvre de sauvetage, pour le remonter ou le descendre à la station la plus proche.

Le multiplicateur se compose d'un piston à garniture, muni d'une grosse tige, et qui peut se mouvoir dans un cylindre en fonte.

La tige laisse entre elle et le cylindre un espace annulaire, qui est rempli, à un moment donné, par de l'eau à la pression des accumulateurs, et qui communique avec la conduite de sauvetage.

Si l'on fait agir également l'eau à cette même pression sous le piston, c'est-à-dire sur sa section pleine, le piston remonte, et la pression de l'eau de l'espace annulaire est multipliée dans le rapport de la section intérieure du cylindre à la surface de l'espace annulaire. Cette pression ainsi multipliée est suffisante pour que l'eau puisse, dans le cas le plus défavorable, remonter jusqu'à la partie supérieure du chemin, et soulever le véhicule en charge sur ses pistons de freins, agissant comme vérins.

Un distributeur à cinq pointeaux (Pl. XLII) permet de faire toutes les manœuvres mentionnées ci-dessus.

L'installation des appareils est complétée par un tableau portant un indicateur de la marche du véhicule, et des manomètres donnant la pression à l'intérieur des différentes presses hydrauliques, en jeu dans l'installation.

§ 3. — Fonctionnement de l'appareil.

Pour mettre en marche l'ascenseur, il est nécessaire de procéder préalablement au remplissage de l'accumulateur à basse pression.

On a vu, en effet, que la pompe Worthington, qui refoule l'eau dans les accumulateurs à haute pression, est établie pour fonctionner sous une charge égale à la différence de pression entre les accumulateurs HP et l'accumulateur BP. Il s'ensuit donc que ce dernier doit être constamment en charge, pour permettre la marche de la pompe.

Mais pour faire le remplissage initial, on ne peut se servir de cette pompe destinée à alimenter la haute pression et qui ne peut refouler dans l'accumulateur BP, en raison du clapet d'isolement qui empêche le retour de l'eau de la pompe vers ces accumulateurs.

Il est nécessaire de se servir d'une petite pompe spéciale installée auprès de la grande, et fonctionnant pour une pression de refoulement de 20 *kg* par cm^2, suffisante pour soulever l'accumulateur à basse pression.

Cette pompe, par une petite canalisation qui lui est propre, aspire l'eau dans le bac de décharge de l'ascenseur, et la refoule dans la conduite générale à haute pression. L'eau passe sous les accumulateurs HP, qu'elle ne peut soulever, et arrive dans l'accumulateur BP par une petite conduite, laquelle est adaptée à l'accumulateur HP n° 2, et porte la soupape d'emplissage de sûreté de ce dernier (voir Pl. XLII, fig. 21 à 23). Quand l'accumulateur BP est rempli, on cesse l'action de la petite pompe et on met la grande en marche. Dès que les accumulateurs HP sont en charge, l'appareil est prêt à fonctionner. Le circuit de l'eau est représenté en détail dans la planche XXXVI.

Nous dirons seulement, au point de vue du fonctionnement de la pompe, que celle-ci fonctionne d'une manière ininterrompue et permet de maintenir d'une façon à peu près constante les accumulateurs HP en haut de course, tandis que l'accumulateur BP est en bas de course. Du reste, des appareils de sécurité limitent les courses dans chacun de ces sens. Pour les accumulateurs à haute pression, ils provoquent à la limite haute de leur course, au moyen d'une soupape de sûreté de décharge, l'évacuation d'une certaine quantité d'eau qui est renvoyée dans la canalisation à basse pression. De même, si l'accumulateur BP se vide et descend à fond de course, la soupape d'emplissage de sûreté dont nous venons de parler s'ouvre, et permet à l'eau de l'accumulateur HP n° 2 de venir soulever à nouveau l'accumulateur BP.

Toutes ces fonctions étant automatiques, il n'est plus nécessaire d'exercer une surveillance sur la marche des accumulateurs des deux piliers.

§ 4. — Rendement et marche de l'appareil.

La course du véhicule suivant le chemin est, comme on l'a vu, de 128,61 *m*, dont 68,41 *m* du sol au 1er étage et 60,20 *m* du 1er au 2e.

La course utile des plongeurs des presses motrices est le huitième de ce chiffre, soit 16,076 *m*.

Les deux plongeurs, qui ont 402 *mm* de diamètre, offrent une section totale de 0,2538 m^2.

La quantité d'eau dépensée pour une course est donc de $0{,}2538 \times 16{,}076 = 4{,}080\ m^3$.

Cette eau, pour que les appareils puissent fonctionner à une température inférieure à 0°, est fortement mélangée de glycérine; la proportion est de 25 p. 100 environ. C'est d'ailleurs toujours la même eau qui sert, sauf les pertes par les fuites de l'appareil; elle est approvisionnée dans le bac de décharge installé au pied de l'ascenseur.

L'eau en pression est fournie par les accumulateurs HP, dont la capacité doit être au moins égale à celle des deux presses.

Or le diamètre des pistons des deux accumulateurs est de 700 *mm*, correspondant à une section de 0,7696 m^2. Leur course est de 5,50 *m*, la quantité d'eau qu'ils peuvent fournir ensemble, en descendant à fond, est donc:

$$0{,}7696 \times 5{,}5 = 4{,}233\ m^3.$$

Cette quantité d'eau suffit pour l'alimentation des presses, pour une course.

En outre, il faut que l'accumulateur à basse pression, dans lequel aspire la pompe, ait lui-même une capacité égale à la précédente.

Le diamètre de son piston est de 1,100 *m* et sa surface de 0,9503 m^2. Le cube correspondant à la course de 5,50 *m* est de 5,227 m^3.

Ce volume dépasse de 1 m^3 environ celui des accumulateurs HP afin de compenser toutes les pertes qui se produisent forcément dans les divers appareils de la distribution.

Le rendement pratique de l'appareil est le suivant:

En admettant que l'eau dans les presses est à une pression effective maxima de 50 *kg* par cm^2, le travail moteur dépensé dans une course est:

$$50 \times 2.538 \times 16{,}076 = 200.200\ kgm.$$

Ce travail étant fourni en une minute, temps effectif du parcours sans arrêt, représente pour les presses une puissance de $\frac{200.200}{60 \times 75} = 450$ chevaux.

Le travail commercial utile se réduit à l'élévation de 100 voyageurs à 70 *kg*, soit 7.000 *kg* du niveau du sol (+ 35,08) au niveau de la 2e plate-forme (+ 149,23), soit sur une hauteur verticale de 114,15 *m*.

Ce travail a donc pour valeur:

$$7.000 \times 114{,}15 = 799.050\ kgm.$$

et correspond à une puissance de 177 chevaux.

Le rendement commercial maximum de l'ascenseur à la montée est par suite $\frac{799.050}{200.200} = 0{,}391$.

Il peut donc varier de 0 à 39 p. 100, suivant que les cabines sont vides ou pleines.

La marche de l'ascenseur a été prévue comme suit pour l'Exposition de 1900.

Aux termes du contrat passé avec la Cie de Fives-Lille, le trajet total aller et retour doit s'effectuer en deux minutes de temps effectif, comprenant un ralentissement d'allure au départ des stations, ainsi qu'avant l'arrêt absolu au sol, au 1er et au 2e étage, sur 5 *m* de parcours environ dans les deux sens.

La vitesse maxima du véhicule sur le chemin doit être ainsi de 2,30 *m* par seconde environ.

Les durées prévues pour les différentes périodes du parcours sont les suivantes:

Montée du sol au 1er étage	30"
Arrêt au 1er étage	60"
Montée du 1er étage au 2e	30"
Arrêt au 2e	60"
Descente du 2e au 1er	30"
Arrêt au 1er	60"
Descente du 1er au sol	60"
Arrêt et changement de voyageurs au sol	60"
Total	360"

L'aller et retour doit donc s'effectuer en 6'. Cette durée correspond, à raison de 100 personnes par voyage, à un nombre de 1.000 voyageurs élevés par heure.

§ 5. — Résumé des données numériques et des calculs dynamiques.

1° *Véhicule.*

Poids du véhicule vide	9.500 *kg*
Charge de 100 voyageurs à 70 *kg*	7.000
Poids total du véhicule en charge	16.500 *kg*
Course du sol au 1er étage	68,410 *m*
Course du 1er au 2e étage	60,200
Course totale	128,610 *m*

Angles, sinus et cos du chemin de roulement de l'ascenseur.

Rez-de-chaussée	54°35	sin 0,815	cos 0,579
1er étage	68°00	sin 0,927	cos 0,976
2e étage	77°30	sin 0,375	cos 0,216

Composante tangentielle du véhicule plein	Rez-de-chaussée	16.500 *kg* × 0,815	= 13.450 *kg*
	1er étage	16.500 × 0,927	= 15.300
	2e étage	16.500 × 0,976	= 16.100
Composante tangentielle du véhicule vide	Rez-de-chaussée	9.500 × 0,815	= 7.750
	1er étage	9.500 × 0,927	= 8.800
	2e étage	9.500 × 0,976	= 9.280
Composante normale du véhicule plein	Rez-de-chaussée	16.500 × 0,570	= 9.550
	1er étage	16.500 × 0,375	= 6.180
	2e étage	16.500 × 0,216	= 3.560
Composante normale du véhicule vide	Rez-de-chaussée	9.500 × 0,570	= 5.500
	1er étage	9.500 × 0,375	= 3.570
	2e étage	9.500 × 0,216	= 2.050

Diamètre D des galets de roulement de la cabine	650 *mm*
— *d* des axes de ces galets	70
Rapport $\frac{d}{D}$	0,107 environ.
Coefficient de frottement des axes dans les boîtes à graisse	0,08
— de roulement des galets	0,003
— total dont il faut affecter la composante normale, pour avoir la résistance passive due au roulement 0,107 × 0,08 + 0,003 = 0,01156, soit	0,012
Coefficient dont il faut affecter *la charge* de la cabine pour avoir la résistance provoquée par le mécanisme de redressement	0,005

En tenant compte de ces coefficients, les efforts développés par le véhicule à la montée ou à la descente, indépendamment du poids des câbles, sont les suivants:

Effort à la montée	Cabine pleine	Rez-de-chaussée	13.450 + 9.550 × 0,012 + 7.000 × 0,005 = 13.600 *kg*
		1er étage	15.300 + 6.180 × 0,012 + 7.000 × 0,005 = 15.410
		2e étage	16.100 + 3.560 × 0,012 + 7.000 × 0,005 = 16.180
	Cabine vide	Rez-de-chaussée	7.750 + 5.500 × 0,012 = 7.820
		1er étage	8.800 + 3.570 × 0,012 = 8.840
		2e étage	9.280 + 2.050 × 0,012 = 9.305
Effort à la descente	Cabine pleine	Rez-de-chaussée	13.450 − (9.550 × 0,012 + 7.000 × 0,005) = 13.300
		1er étage	15.300 − (6.180 × 0,012 + 7.000 × 0,005) = 15.190
		2e étage	16.100 − (3.560 × 0,012 + 7.000 × 0,005) = 16.020
	Cabine vide	Rez-de-chaussée	7.750 − 5.500 × 0.012 = 7.680
		1er étage	8.800 − 3.570 × 0,012 = 8.760
		2e étage	9.280 − 2.050 × 0,012 = 9.255

2° *Câbles.*

Nombre des câbles de traction	6
Poids au mètre courant d'un câble	2,6 *kg*
Poids au mètre courant des 6 câbles	15,6
Partie constante du poids des câbles, pour la longueur de 140 *m*, allant des presses aux poulies de renvoi du 2e étage, 140 × 15,6, soit	2.180
Poids réduit, obtenu en multipliant le poids réel par 0,970 pour tenir compte de l'inclinaison du câble (0,970 étant le sinus de l'inclinaison sur l'horizontale de la direction du câble à la partie supérieure, soit 75°50')	2.120

Longueur variable des câbles allant des poulies du 2e étage au véhicule	Véhicule au rez-de-chaussée	138 *m*
	— au 1er étage : 138 − 68 =	70
	— au 2e étage : 138 − 129 =	9
Poids réduit (coefficient de réduction : 0,970)	Véhicule au rez-de-chaussée	2.090 *kg*
	— au 1er étage	1.060
	— au 2e étage	120

3° *Mouflage à 8 brins.*

Coefficient de frottement des poulies supérieures de renvoi et de l'incurvation des câbles : Montée : 1,01 ; Descente : 0,99

(Ce coefficient, calculé comme pour l'ascenseur Otis, pages 146 et 148, est ici très faible en raison du grand diamètre des poulies.)

Effort *à la montée* du garant du moufle près de la poulie de renvoi inférieure	Cabine pleine	Rez-de-chaussée	13.600 × 1,01 + 2.090 − 2.120 = 13.700 *kg*
		1er étage	15.410 × 1,01 + 1.060 − 2.120 = 14.500
		2e étage	16.180 × 1,01 + 120 − 2.120 = 14.340
	Cabine vide	Rez-de-chaussée	7.820 × 1,01 + 2.090 − 2.120 = 7.870
		1er étage	8.840 × 1,01 + 1.060 − 2.120 = 7.870
		2e étage	9.305 × 1,01 + 120 − 2.120 = 7.400

Effort *à la descente* du garant du mouffle près de la poulie de renvoi inférieure.....

Cabine pleine.	Rez-de-chaussée.	13.300×0,99+2.090−2.120=	13.140
	1er étage.	15.190×0,99+1.060−2.120=	13.979
	2e étage.	16.020×0,99+ 120−2.120=	13.800
Cabine vide.	Rez-de-chaussée.	7.680×0,99+2.090−2.120=	7.570
	1er étage.	8.700×0,99+1.060−2.120=	7.610
	2e étage.	9.255×0,99+ 120−2.120=	7.163

Coefficient par lequel il faut multiplier l'effort dans le garant, pour avoir l'effort dans le deuxième brin..... Montée : 1,012 ; Descente : 0,988

(Même observation que précédemment ; les poulies ont 3 *m* de diamètre au lieu de 4 *m*.)

Coefficient par lequel il faut multiplier l'effort dans le garant pour avoir l'effort dans le brin mort..... Montée : $\overline{1,012^7}$ = 1,087 ; Descente : $\overline{0,988^7}$ = 0,919

Coefficient par lequel il faut multiplier l'effort dans le garant, pour avoir l'effort total dans le mouffle..... Montée : $\frac{\overline{1,012^8}-1}{1,012-1}$ = 8,34 ; Descente : $\frac{1-\overline{0,988^8}}{1-0,988}$ = 7,66

(Somme d'une progression géométrique.)

Effort sur le brin mort *à la montée*.....

Cabine pleine.	Rez-de-chaussée :	13.700×1,087= 14.900 *kg*
	1er étage :	14.500×1,087= 15.780
	2e étage :	14.340×1,087= 15.600
Cabine vide.	Rez-de-chaussée :	7.870×1,087= 8.560
	1er étage :	7.870×1,087= 8.560
	2e étage :	7.400×1,087= 8.050

Effort total sur le mouflage à 8 brins, *à la montée*.....

Cabine pleine.	Rez-de-chaussée :	13.700× 8,34=114.200 *kg*
	1er étage :	14.500× 8,34=120.900
	2e étage :	14 340× 8,34=119.500
Cabine vide.	Rez-de-chaussée :	7.870× 8,34= 65.600
	1er étage :	7.870× 8,34= 65.600
	2e étage :	7.400× 8,34= 61.700

Effort sur le brin mort *à la descente*.....

Cabine pleine.	Rez-de-chaussée :	13.140×0,919= 12.100 *kg*
	1er étage :	13.979×0,919= 12.800
	2e étage :	13.860×0,919= 12.720
Cabine vide.	Rez-de-chaussée :	7.570×0,919= 6.950
	1er étage :	7.610×0,919= 7.000
	2e étage :	7.163×0,919= 6.580

Effort total sur le mouflage à 8 brins *à la descente*.....

Cabine pleine.	Rez-de-chaussée :	13.140×7,66 =100.650 *kg*
	1er étage :	13.979×7,66 =106.900
	2e étage :	13.860×7,66 =106.000
Cabine vide.	Rez-de-chaussée :	7.570×7,66 = 58.000
	1er étage :	7.610×7,66 = 58.300
	2e étage :	7.163×7,66 = 54.800

4° *Tendeurs.*

Effort maximum sur un tendeur *à la montée*. $\frac{15.760}{6}$ = 2.630 *kg*

Section annulaire de la face avant d'un tendeur ..... 78,32 *cm²*

Pression en *kg* par *cm²*..... 34 *kg*

Effort maximum sur un tendeur *à la descente*. $\frac{12.800}{6}$ = 2.160

Pression en *kg* par *cm²*..... 27,70

5° *Effort moteur à la montée. — Presses et accumulateurs à haute pression.*

I. — Pression fournie par les accumulateurs a haute pression.

Poids de la partie mobile des accumulateurs à haute pression { Poids propre 34.145 *kg* ; Lest — 166.000 }..... 200.145 *kg*

Diamètre du piston d'un accumulateur..... 780 *mm*

Section correspondante..... 3.848 *cm²*

Pression de l'eau correspondante en *kg* par *cm²*..... 52 *kg*

Perte de charge pratique, des accumulateurs aux presses, pour la vitesse de 2,50 *m* et en *kg* par *cm²*. 2 *kg*

II. — Effort effectif des pistons moteurs, a la montée.

Pression effective sur les plongeurs en *kg* par *cm²*... 50 *kg*

Section des deux plongeurs $2\frac{\pi\times\overline{0,402}^2}{4}$ ..... 2.538 *cm²*

Effort hydraulique des deux plongeurs sans tenir compte des frottements..... 126.900 *kg*

Ces frottements sont les suivants :

Poids du chariot de tête, du quart des câbles mouflés et de la moitié du piston.	16.000 *kg*	
Résistance au roulement, et frottements du chariot, 1 p. 100 du poids roulé, soit 160, et pour les 2.....	320	
Frottement des garnitures, 2 p. 100, sur 126.900	2.538	
Résistances passives totales des presses.....		2.858 *kg*
Effort effectif maximum des pistons moteurs.....		124.042
Effort résistant au 1er étage.....		120.900
Excès de puissance motrice produisant la vitesse de 2,50 *m* pour le véhicule.....		3.142

6° *Effort de traction du véhicule à la descente. — Accumulateurs à basse pression.*

Dans le cas le plus défavorable, c'est-à-dire le véhicule étant vide et aux environs du 2e étage, l'effort de ce dernier doit être suffisant pour soulever l'accumulateur à basse pression.

Effort total minimum du véhicule sur le mouffle.....		54.800
Frottement des garnitures et roulement des chariots de tête. (Roulement 320. Frottement des garnitures 2 p. 100 sur 54.800 = 1.100).....		1.420
Effort réel.....		53.380
Pression correspondante dans les presses par *cm²*...		21 *kg*
Perte de charge par *cm²* jusqu'à l'accumulateur à basse pression.....		2
Pression effective par *cm²* sous le piston de l'accumulateur BP : 21 — 2.....		19
Diamètre du piston de l'accumulateur.....		1,100 *m*
Section correspondante.....		9.503 *cm²*
Pression totale de soulèvement.....		180.557 *kg*
Poids de la partie mobile { Poids propre. 35.328 *kg* ; Lest..... 138.600 }		173.928
Cette charge donne dans l'accumulateur une pression d'environ.....	18 *kg*	
Excès produisant la vitesse de 2,50 *m* pour le véhicule.....		6.649

Nos dessins indiquent pour les caisses de charge une hauteur de 4,40 *m* pour les accumulateurs HP et 3,50 *m* pour l'accumulateur BP : elles étaient destinées à recevoir un lest complètement métallique. Elles ont été relevées d'une virole de 1,20 *m* et la capacité correspondante a été remplie de pavés et de sable formant le complément de lest jugé nécessaire.

§ 6. — Résumé des poids de l'appareil.

Véhicule à deux cabines pour 100 voyageurs avec freins hydrauliques de sûreté, mécanisme de redressement, appareil pour la mise en marche et l'arrêt.	9.500 *kg*
Câble de manœuvre.	200
Poulies d'inflexion du câble de manœuvre avec arbre et supports, contre-poids du câble, et mécanisme inférieur de transmission aux soupapes d'arrêt et de mise en marche.	2.210
A reporter.	11.910

	Report. . .	11.910 *kg*
6 câbles de traction du véhicule de 500 *m.*		7.880
2 poulies de suspension des cabines de 4 *m* de diamètre à triple gorge, avec arbres et coussinets pour le renvoi des 6 câbles en haut du chemin de l'ascenseur		6.818
Poulies d'inflexion des câbles de traction placées le long du chemin, avec arbres et supports complets.		6.950
2 crémaillères de sûreté à longue denture en acier laminé brut, avec les rails de la voie, adaptés sur les poutres du chemin de roulement. Boulons et rivets d'attache		25.150
1 crémaillère acier à denture taillée placée le long de la poutre gauche du chemin de l'ascenseur pour commander le redressement des cabines.		4.242
2 presses hydrauliques en acier, avec les chariots de tête, voie de roulement de ces derniers, poulies fixes et poulies mobiles de mouflage, ainsi que les poulies de support en fonte, et poulies de renvoi en acier, les 2 groupes de tendeurs.		84.557
2 chevalets complets en tôlerie des poulies fixes de mouflage. . . .		7.390
2 chevalets complets en tôlerie des poulies intermédiaires supportant les câbles.		2.222
2 chevalets supportant les tendeurs, avec leurs soupapes de sûreté. .		950
2 chevalets complets des poulies de renvoi des câbles dans la Tour. .		4.214
2 accumulateurs en fonte à haute pression, avec cuve de chargement en tôlerie. Pour 1 accumulateur { Partie mobile. . . . . 34.145 / Partie fixe. . . . . 36.031 }		140.352
1 accumulateur à basse pression { Partie mobile. . . . . 35.328 / Partie fixe. . . . . 34.796 }		70.124
9 soupapes annexées aux trois accumulateurs, pour l'isolement, pour en limiter la course et comme sûreté contre les ruptures des conduites. .		7.880
2 clapets d'isolement s'opposant au transvasement réciproque des accumulateurs alimentés par les mêmes pompes.		670
Soupapes annexées aux presses motrices pour l'isolement, pour la sécurité contre les ruptures, et pour en limiter la course.		2.300
2 soupapes d'arrêt et de mise en marche des presses motrices, pour la montée et la descente.		6.796
2 régulateurs de vitesse pour la montée et la descente avec mécanisme automatique de ralentissement aux stations et transmission. . . .		9.400
1 coupleur des presses motrices (sans les robinets d'arrêt).		1.871
1 soupape d'arrêt de sûreté fixée sur le coupleur.		56
1 tableau indicateur de marche avec son pot de jonction.		320
1 multiplicateur de pression avec son robinet.		3.922
1 tuyauterie à haute pression de 150 *m* de longueur environ, reliant la pompe aux accumulateurs à haute pression.		8.232
1 tuyauterie à basse pression de 150 *m* de longueur environ reliant la pompe à l'accumulateur à basse pression.		4.835
Tuyauterie en fonte et acier, reliant les accumulateurs aux soupapes de mise en marche, aux régulateurs de vitesse et aux presses.		13.000
Tuyauteries diverses.		452
Robinets divers de l'installation.		3.650
	A reporter. . .	436.143

Report. . .	436.143 *kg*
Bac de vidange en tôle de 12 m^3.	2.173
Bacs des tendeurs et des presses.	427
Total pour 1 ascenseur.	438.743 *kg*
Soit pour les 2 ascenseurs.	877.486 *kg*

Ces deux ascenseurs ont fait l'objet d'un contrat à forfait avec la C^ie^ de Fives-Lille pour un prix global de 630.000 *fr* s'appliquant aux matériaux en gare du Champ de Mars.

Le montage complet, la fourniture du lest, les travaux de terrassement et de maçonnerie, les charpentes et attaches sur la Tour des poulies de suspension et de renvoi, ainsi que les pompes d'alimentation, sont restés à la charge de la Société : les dépenses qui y sont afférentes sont les suivantes :

Deux pompes Worthington.	52.500 *fr.*
Un condenseur de ces pompes.	10.200
Deux pompes d'emplissage des accumulateurs à basse pression. . . .	1.880
Socles de jonction des pompes, 4.796 *kg* à 0,95 *fr*.	4.556
Quatre robinets vannes des socles, 1.820 *kg* à 2,10 *fr*.	3.822
Accessoires des socles.	930
Canalisation provisoire de raccord entre les pompes et la canalisation générale du pilier Ouest	3.000
Conduites de vapeur et canalisation des pompes aux condenseurs. . .	1.400
Accès des cabines et paliers (Bernard), 25.000 *kg* à 0,80 *fr*.	20.000
Charpente en fer des poulies de suspension et d'inflexion des câbles (S^te^ de Levallois-Perret), 40.000 *kg*.	22.700
Lest des accumulateurs (700 *t* à 60,50 *fr*, plus pavés et sable). . . .	50.000
Maçonnerie et terrassements.	150.000
Planchers des piles Est et Ouest, 32.000 *kg*.	25.000
Montage, matières et main-d'œuvre.	75.000
Total.	420.988 *fr.*

Le prix de revient complet de ces deux ascenseurs, suivant les prévisions, est donc de :

Montant du forfait.	630.000 *fr.*
Dépenses incombant à la Société de la Tour. . . .	420.988
Total général. . . .	1.050.988 *fr.*

CHAPITRE IV

ASCENSEUR OTIS DU PILIER NORD

Nous avons vu, au commencement de la huitième partie, que l'on se proposait, pour l'Exposition de 1900, de supprimer l'ascenseur Otis du pilier Sud et d'affecter celui du pilier Nord au service des voyageurs du sol au 1er étage.

On s'est arrêté au projet de transformation qui va être décrit.

§ 1. — Modifications apportées à l'ascenseur.

La course du sol au 1er étage étant environ la moitié de la course totale, il devient possible, pour une même course du piston moteur, de moufler le chariot mobile à 7 brins au lieu de 12 et d'augmenter dans le même rapport la charge à élever.

La charpente des poulies de la 2e plate-forme a été descendue à la 1re. Quant aux poulies elles-mêmes, celles qui reçoivent les câbles de traction sont remplacées par des poulies de 3 *m* de diamètre du genre de celles employées par la Cie de Fives-Lille pour ses ascenseurs.

La distribution actuelle et sa commande sont conservées, ainsi que tous les câbles de l'appareil dont la longueur seulement est réduite.

Mais il n'en est pas de même pour la voie de roulement et pour le véhicule qui sont complètement modifiés. On a adopté pour eux la disposition qui a été appliquée par la Cie de Fives-Lille aux ascenseurs des piliers Est et Ouest.

L'ensemble des nouvelles dispositions est le suivant :

1° *Appareil moteur.*

Tout ce qui concerne le cylindre proprement dit et la distribution actuelle reste dans le même état. La course seule du piston est légèrement modifiée.

La course avec le mouflage à 12 brins était de 10,827 *m* ; avec la course actuelle du véhicule, soit 68,46 *m*, et le mouflage à 7 brins, elle est de $\frac{68,46}{7} = 9,78$ *m*.

Le chariot mobile de tête a subi de légères modifications résultant du changement de mouflage.

Les 4 câbles qui aboutissent au chariot ont été divisés par paires; chaque paire se moufle sept fois sur les poulies. Cette disposition, qui permet de venir faire l'attache des câbles dans l'axe du chariot, entraîne l'adjonction de trois poulies fixes, ainsi qu'il est indiqué dans le schéma de la figure 244. Les paires de

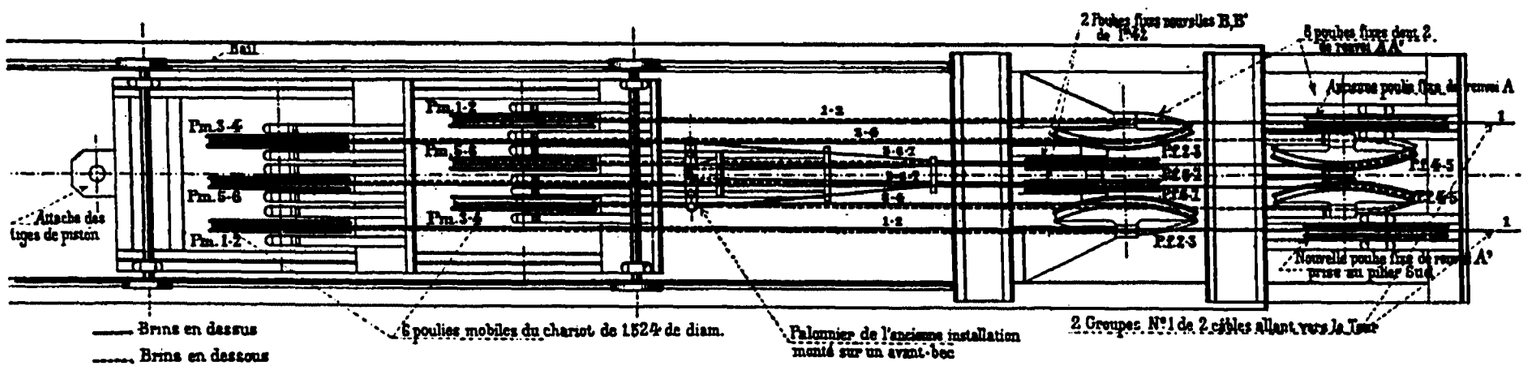


Fig. 244. — Schéma du nouveau mouflage vu en plan. Échelle 0,015 par *m*.

câbles reçues sur les poulies de renvoi A et A' passent sur les différentes poulies de mouflage et viennent s'attacher au palonnier, lequel est reporté de son ancienne position sur un bec adapté à l'avant du chariot mobile. Les poulies BB' sont de nouvelles poulies en acier ayant un diamètre de 1,42 *m* au lieu de

1,524 *m* qu'ont les autres poulies du mouflage. Cette diminution du diamètre est nécessaire pour permettre l'attache du brin mort sur le palonnier.

La charpente de support des poulies de renvoi a été placée au 1er étage. Les poulies y ont conservé à peu près la même disposition. Toutefois, les deux câbles moteurs de chaque côté de la cabine sont renvoyés par une poulie de 3 *m* de diamètre à 3 gorges indépendantes, montée sur une charpente spéciale construite du côté de la voie.

Les deux paires de câbles reviennent vers le moteur guidées par des poulies d'inflexion.

Les deux câbles de contrepoids, qui sont ceux de l'ancien ascenseur, sont renvoyés de la cabine vers ce dernier qui reste mouflé à trois brins.

Le poids total du nouveau contrepoids n'est plus que de 15.000 *kg* au lieu de 20.660 *kg*. Ce poids comprend 4.478 *kg* de poids propre et 10.522 *kg* de lest en fonte.

2° *Voie et véhicule.*

La voie est semblable à celle des ascenseurs des piliers Est et Ouest et porte une double crémaillère sur laquelle peuvent s'accrocher les griffes des freins de sûreté portés par le véhicule.

Le véhicule, analogue à celui de ces mêmes ascenseurs, n'en diffère que par les points suivants :

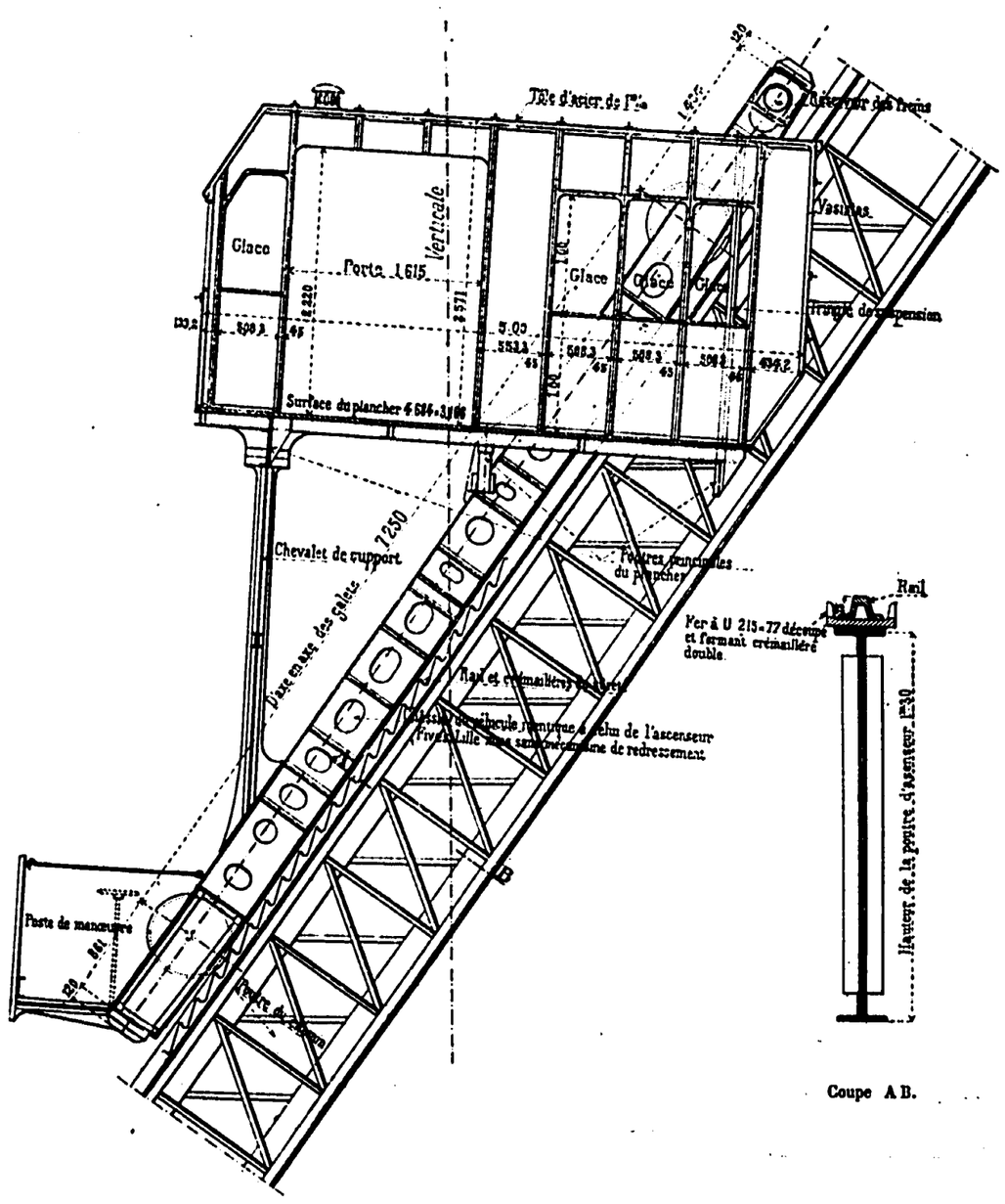


Fig. 245. — Coupe par l'axe du véhicule. Échelle 1/50.

La cabine contenant 80 voyageurs est à un seul étage. De plus, au lieu d'être en aluminium, elle est construite en acier.

Le châssis contient les mêmes organes de sûreté constitués de la même façon, sauf toutefois le mécanisme de redressement qui aurait été sans utilité. Le plancher de la cabine est donc directement fixé sur les longerons du châssis.

Enfin ce dernier porte à sa partie inférieure le poste de manœuvre avec son volant de mise en marche, et son levier à main, commandant le déclenchement des freins de sûreté.

Ces freins ont un fonctionnement semblable à celui déjà décrit, et ils sont appelés à jouer le même rôle dans le cas de la manœuvre de sauvetage du véhicule.

Pour cette dernière manœuvre et afin d'introduire de l'eau en pression dans les cylindres de frein, deux conduites sont disposées le long de la voie, l'une à haute pression, l'autre pour l'évacuation.

L'eau à haute pression de la première conduite est fournie par un petit accumulateur placé à la base du pilier.

Cet accumulateur a un piston de 130 *mm* de diamètre donnant une section de 133 *cm²*. Le poids de la partie mobile est de 10.000 *kg*, correspondant à une pression par *cm²* de 75 *kg*.

Le volume engendré par une course est de 13,27 *l*. Pour l'alimenter, on emploie une pompe à bras donnant une pression de 125 *kg* par *cm²*.

L'eau à cette pression peut, au sortir de l'accumulateur, franchir la hauteur nécessaire, qui est de 50 *m* environ, et vaincre, une fois introduite dans les cylindres de frein, l'effort de 9.000 *kg* correspondant à la cabine en charge au 1er étage.

§ 2. — Marche et rendement de l'ascenseur.

On peut admettre, comme pour l'ascenseur Fives-Lille, 60" pour l'échange de voyageurs, soit au 1er, soit au sol; en comptant également 60" pour le parcours simple, le trajet complet aller et retour demandera 4 minutes, ce qui correspond à 15 voyages à l'heure. Avec le nombre de 80 voyageurs, le rendement maximum peut être de 1.200 voyageurs à l'heure.

§ 3. — Résumé des données numériques et des calculs dynamiques.

1° *Cabine.*

Poids du véhicule vide	9.500 *kg*
Charge de 80 voyageurs à 70 *kg*	5.600
Poids du véhicule chargé	15.100
Course du véhicule	68,46 *m*

2° *Chemin de roulement.*

Angle du chemin et de l'horizontale.

Rez-de-chaussée	54°35'	Sin = 0,815 ; Cos = 0,579
1er étage	62°35'	Sin = 0,887 ; Cos = 0,462

3° *Appareil hydraulique moteur.*

Diamètre du piston	0,965 *m*
Surface active du dessus du piston	7.131 *cm²*
— dessous du piston	7.313
Course	9,78 *m*
Différence de niveau entre le réservoir d'alimentation et le réservoir de décharge	120
Pression théorique par *cm²*	12 *kg*

Masses mobiles

Poids du chariot	10.000 *kg*	
Riblons	5.080	
Pistons et tiges	4.500	
Câbles de mouflage (en moyenne)	600	
		20.180 *kg*

Angle du chemin du chariot mobile : 61°20' ; Sin = 0,877 ; Cos = 0,479

Poulies du mouflage.

Diamètre d'enroulement	1,524 *m*
Diamètre des fusées	127 *mm*

4° *Contrepoids.*

Poids du chariot proprement dit	4.478 *kg*
Lest ajouté	10.522
Poids total du chariot	15.000 *kg*

Angle du chemin du contrepoids avec l'horizontale : 54°35'. Sin = 0,815 ; Cos = 0,579

Poulie du contrepoids.

Diamètre de l'enroulement.	1,830 *m*
Diamètre des fusées	160 *mm*

5° *Poulies diverses.*

Poulies de renvoi des câbles du contrepoids au 1er étage.	Diamètre à l'enroulement	1,312 *m*
	— des fusées	0,101
Poulies de renvoi des câbles moteurs à 3 gorges indépendantes.	Diamètre à l'enroulement	3,00
	— des fusées	115 *mm* et 95 *mm*
Poulies d'inflexion du côté de la cabine.	Diamètre à l'enroulement	1,500 *m*
	— des fusées	90 *mm* et 55 *mm*
Poulies d'inflexion du côté du moufle moteur.	Diamètre à l'enroulement	1,200 *m*
	— des fusées	80 *mm*

6° *Câbles.*

Câbles moteurs.	Diamètre extérieur	23 *mm*
	Poids au mètre courant	1,7 *kg*
Câbles du contrepoids.	Diamètre extérieur	29 *mm*
	Poids au mètre courant	2,7 *kg*

7° *Efforts dynamiques.*

Pour le calcul des efforts dynamiques, on peut appliquer la même méthode de calculs que celle que nous avons exposée au chapitre II de la IVe partie. On arrive ainsi aux efforts principaux suivants :

a) *Traction exercée par les câbles du contrepoids à leur attache sur le véhicule.*

POSITIONS DU VÉHICULE.	ASCENSION DU VÉHICULE.	DESCENTE DU VÉHICULE.
	kg	*kg*
Au rez-de-chaussée	3.706	3.940
Au 1er étage	4.224	4.400

b) *Tractions dans le mouflage à 7 brins.*

DÉSIGNATION.	ASCENSION DU VÉHICULE.				DESCENTE DU VÉHICULE.			
	AU 1er ÉTAGE.		AU REZ-DE-CHAUSSÉE.		AU 1er ÉTAGE.		AU REZ-DE-CHAUSSÉE.	
	Cabine pleine.	Cabine vide.	Cabine pleine.	Cabine vide.	Cabine pleine.	Cabine vide.	Cabine pleine.	Cabine vide.
	kg	*kg*	*kg*	*kg*	*kg*	*kg*	*kg*	*kg*
Traction dans le garant.....	9.047	4.035	8.938	4.319	8.723	3.765	8.508	3.967
Traction dans le dormant.....	9.834	4.434	9.716	4.747	8.514	3.652	8.304	3.848
Traction totale sur le mouffle.....	66.043	29.617	65.247	31.701	61.061	25.978	59.556	27.372

Les efforts maxima correspondent à la cabine pleine en haut de course. A la montée ils sont de :

9.047 *kg* sur le garant du mouffle.
9.834 dans le dormant.
66.043 sur le palonnier d'attache du chariot aux tiges du piston.

Des deux tableaux précédents, il résulte pour les câbles de contrepoids un effort maximum de 4.400 *kg* par paire de câbles, soit pour chacun d'eux 2.200 *kg*, effort plus faible que dans l'ancienne disposition où il était de 2.830 *kg*.

Quant aux câbles moteurs, l'effort maximum sur le brin mort est de 9.834 *kg* sur l'ensemble des quatre câbles, c'est-à-dire 2.460 *kg* sur chacun d'eux. Ce dernier effort est légèrement supérieur à celui de l'ancienne disposition, où il était de 2.144 *kg*. La section métallique du câble est de 188,25 mm^2, le travail à la traction par mm^2 dans la nouvelle disposition est égal à $\frac{2.460}{188,25} = 13,06$ *kg*.

Les poulies de mouflage n'ayant pas été changées, le travail dû à l'incurvation du câble reste ce qu'il était, soit de 11,8 *kg*.

Le travail total maximum du câble dans la nouvelle disposition est donc de $13,06 + 11,8 = 24,86$ *kg*, chiffre très admissible.

Quant aux poulies de mouflage, elles sont dans des conditions beaucoup plus favorables, puisque chacune d'elles n'est plus soumise qu'à l'action de deux câbles au lieu de quatre.

c) *Effort moteur.*

A la montée, l'effort moteur absolu n'a pas varié ; il est toujours égal à la pression de l'eau sur le piston, augmentée de l'action des masses mobiles du moteur ; mais l'effort effectif moteur est différent par suite de l'augmentation des pertes de charge résultant de l'augmentation de vitesse du piston moteur.

L'action effective des masses mobiles est :

Cas de l'ascension du véhicule : 16.741 *kg*.
Cas de la descente du véhicule : 18.050

Pour connaître l'action de l'eau, il est nécessaire de tenir compte des nouvelles pertes de charge, lesquelles sont résumées dans le tableau ci-dessous, pour les trois vitesses du véhicule de 1,00 *m*, 1,50 *m* et 2,00 *m*.

DÉSIGNATION.	VITESSES DU VÉHICULE.		
	1,00 m.	1,50 m.	2,00 m.
	kg	*kg*	*kg*
Perte de charge dans la conduite reliant le réservoir du 2e étage au distributeur..	0,423	0,946	1,706
Perte de charge dans la grille du distributeur.....	0,898	1,990	3,560
Perte de charge totale.....	1,321	2,936	5,266

La pression totale effective de l'eau est donc la suivante, en tenant compte, pour l'entrée du liquide en pression, de la perte de charge dans la conduite, et pour la sortie du liquide au bas du cylindre, de la perte de charge à travers la grille du distributeur.

Vitesse de 1,00 *m* : $(12 - 0,423)7.131 - 0,898 \times 7.313 = 75.988$ *kg*
— 1,50 *m* : $(12 - 0,946)7.131 - 1,990 \times 7.313 = 64.245$
— 2,00 *m* : $(12 - 1,706)7.131 - 3,560 \times 7.313 = 47.362$

A ces chiffres, il convient d'ajouter celui représentant l'action des masses mobiles à la montée et qui est de 16.741 *kg*. On a donc pour effort moteur total, aux trois vitesses considérées :

Vitesse de 1,00 *m* $75.988 + 16.741 = 92.729$ *kg*
— 1,50 *m* $64.245 + 16.741 = 80.986$
— 2,00 *m* $47.362 + 16.741 = 63.103$

Ces chiffres sont à comparer avec ceux contenus dans les tableaux précédents et donnant l'effort résistant dû à la cabine pleine, au rez-de-chaussée et au 1er étage. Les efforts correspondant à ces deux positions sont de 65.247 *kg* et de 66.043 *kg*.

On peut donc conclure que la vitesse du véhicule en charge pourra être supérieure à 1,50 *m*, et atteindre tout près de 2,00 *m*.

A la descente, l'effort minimum de traction du véhicule vide est de 25.978 *kg*. Il est suffisant pour vaincre l'action des masses mobiles, qui est dans ce cas de 18.050 *kg*, et les pertes de charge de l'intérieur du cylindre.

Quant à la compression qui se produit pendant la descente à la partie supérieure du cylindre, elle est maximum quand la cabine pleine est au 1er étage : l'effort de la cabine est de 61.061 *kg* dont il faut retrancher l'action des masses mobiles, soit 18.050 *kg*. Il reste 43.011 *kg* donnant une pression de $\frac{43.011}{7.131} = 6,03$; cette contre-pression, ajoutée à la pression du réservoir, donne un total de 18 *kg*. Cette pression est plus faible que celle qui s'exerçait précédemment : l'effort de la cabine s'élevait, en effet, à 78.819 *kg* et la pression correspondante à 20 *kg*.

L'ensemble de l'appareil est donc pour tous ses organes dans des conditions plus favorables.

CHAPITRE V

ASCENSEUR VERTICAL

Les modifications apportées à cet ascenseur ont pour but de permettre d'élever, quand les cabines sont à peu près également chargées, un nombre de 80 voyageurs au lieu de 65 et de donner aux cabines une vitesse moyenne de 1,00 *m*, de manière à réaliser environ 10 voyages à l'heure. Ce nombre de 80 et surtout celui de 75 ont été souvent réalisés pendant l'Exposition de 1889; mais dans ces conditions, le public, entassé dans une cabine dont la surface est inférieure à 14 m^2, soit à raison de 5 à 6 personnes par mètre, est extrêmement gêné; le peu de liberté qu'il a dans ses mouvements rend très lentes les entrées et les sorties. En se restreignant à 4 personnes par mètre carré, la circulation est beaucoup facilitée.

Mais il est entendu que l'établissement d'équilibre normal de l'appareil n'est pas modifié, et que la différence de charge ne peut dépasser 4.000 *kg* entre les deux cabines.

Pour atteindre le but proposé, on a aménagé le toit des cabines en impériale de manière à recevoir sur celle-ci 25 voyageurs, et on n'admettra plus à l'intérieur que 55 voyageurs, soit en tout 80.

Relativement à la distribution de l'eau, nous avons vu dans l'étude de cet ascenseur qu'il s'y produisait des pertes de charge considérables. On a cherché à les diminuer en augmentant le diamètre des conduites, en améliorant la distribution par l'emploi d'un distributeur Otis et enfin en modifiant la tête des cylindres de manière à faciliter l'entrée de l'eau.

Enfin, ces conditions de charge et de vitesse ont amené à l'étude d'un appareil de sécurité plus perfectionné que celui précédemment employé.

§ 1. — **Modifications des cabines et de la distribution.**

L'intérieur de la cabine ne reçoit d'autres modifications que celle de l'élargissement des portes. Cette largeur sera portée à 1,10, *m* donnant une augmentation de 0,05 *m*.

Pour la partie supérieure formant impériale, on s'est contenté d'établir un léger plancher entouré d'un haut garde-corps grillagé.

Au point de vue de la distribution, nous avons établi précédemment que pour une différence de charge de 4.000 *kg* la vitesse ne dépasse pas 0,50 *m* à la seconde, en raison des pertes de charge importantes qui se produisent.

Afin de les diminuer, on a apporté la modification suivante :

1° On a changé la conduite reliant le réservoir du 3ᵉ étage aux distributeurs établis au plancher intermédiaire.

L'ancienne conduite avait un diamètre intérieur de 200 *mm*; elle a été remplacée par une conduite de 250 *mm*;

2° La tuyauterie de la distribution de l'étage intermédiaire, qui avait 150 *mm* de diamètre, a été remplacée, en grande partie, par une tuyauterie de 250 *mm* ;

3° Des deux distributeurs Edoux, un seul a été conservé, l'autre étant remplacé par un distributeur Otis, donnant un plus grand débit et absorbant une charge moindre. Ce distributeur est capable à lui seul d'assurer le service de l'ascenseur, l'ancien distributeur devenant surtout un appareil de secours ;

4° Enfin, on a modifié les têtes de cylindres, qui, par une introduction défectueuse de l'eau, absorbaient

une forte part de la pression statique. Cette introduction a lieu dans les nouvelles têtes (Voir fig. 246), par une section plus grande, et avec une forme plus rationnelle, évitant au liquide de frapper normalement les parois du plongeur.

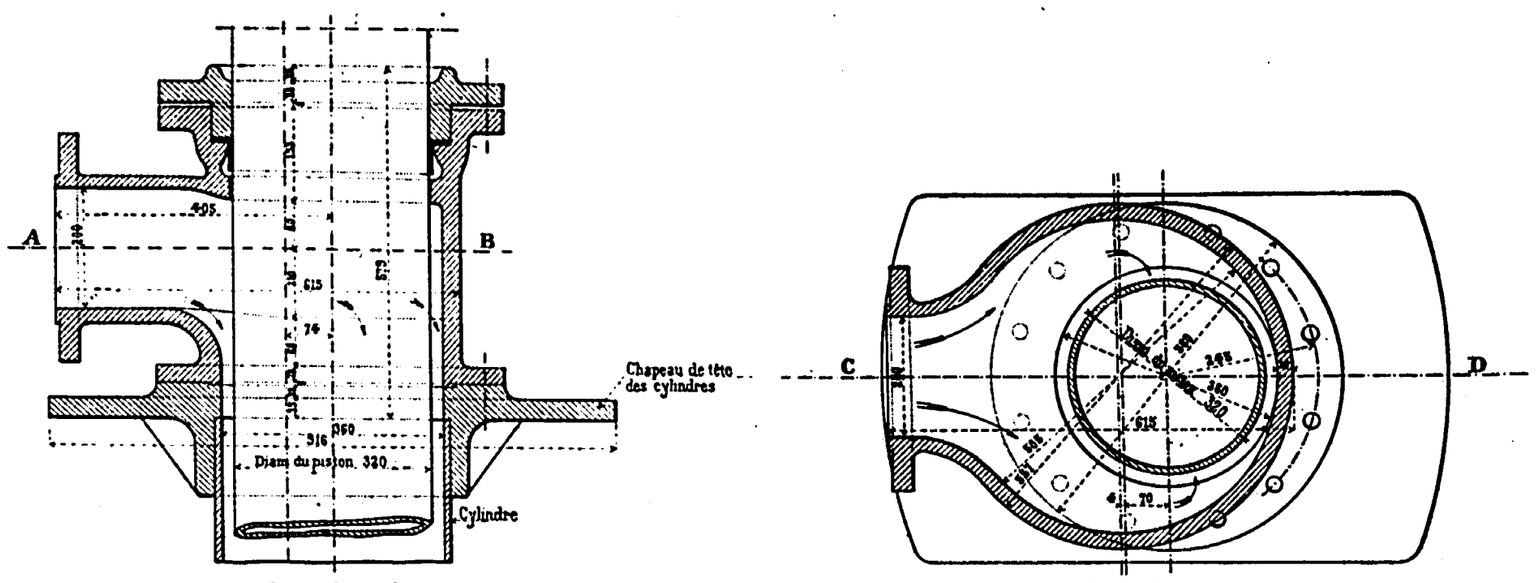


Fig. 246. — Nouvelles têtes des cylindres. Échelles 1/10.

La tuyauterie de la nouvelle distribution (Voir fig. 247) a un diamètre de 250 pour le distributeur Otis

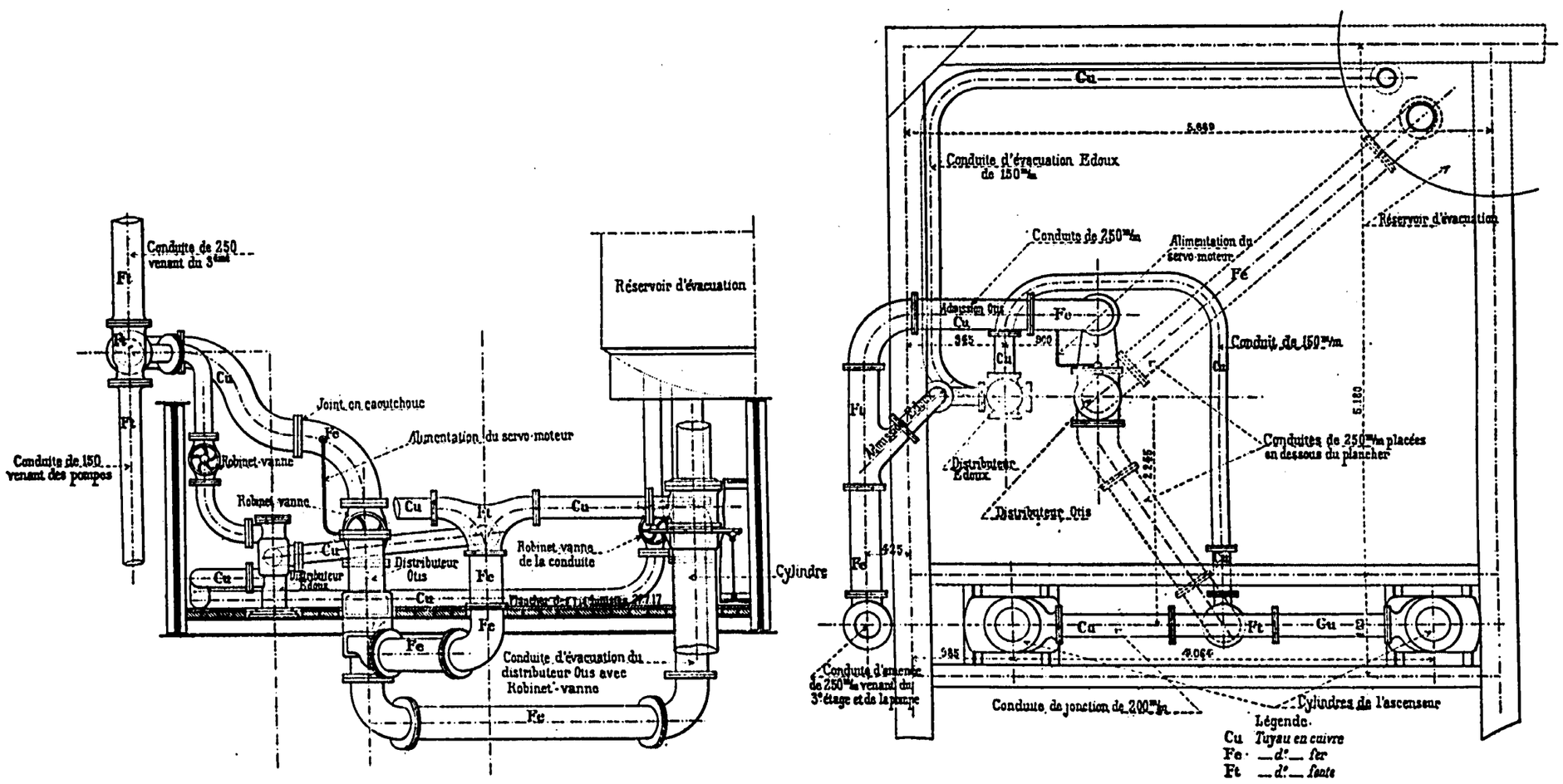


Fig. 247. — Nouvelle distribution. Échelle 1/50.

et de 150 pour le distributeur Edoux. Elle est disposée de telle façon que l'eau peut être envoyée dans les cylindres, soit par chacun des distributeurs, soit par les deux simultanément.

§ 2. — Frein de sûreté hydraulique.

L'emploi du frein Backmann présente une grande sécurité en cas d'une rupture de câble, surtout si l'on admet qu'après la mise en contact des cônes de friction, la rotation du fuseau continue à se produire pendant un temps même très court. Néanmoins, pour l'augmenter encore et permettre à la puissance vive due à la

chute d'être absorbée dans un temps plus long et de causer aux différents organes une moindre fatigue, on a jugé utile d'ajouter à l'élasticité des rondelles Belleville dont la course est de 80 *mm* seulement, celle d'un frein hydraulique d'une course de 900 *mm*. Cette augmentation importante de la course, qui au total est de 980 *mm*, diminue considérablement les efforts supportés par les organes d'attache du parachute au moment de son fonctionnement.

Le frein hydraulique est formé de deux presses placées symétriquement par rapport à l'axe du châssis portant le parachute (Voir fig. 248).

Chacune des presses comprend un piston plongeur de 100 *mm* de diamètre qui, en pénétrant dans un cylindre alésé à 120 *mm* de diamètre, refoule le liquide dans un réservoir ouvert à l'air libre en le faisant passer par une soupape d'équilibre munie d'un ressort.

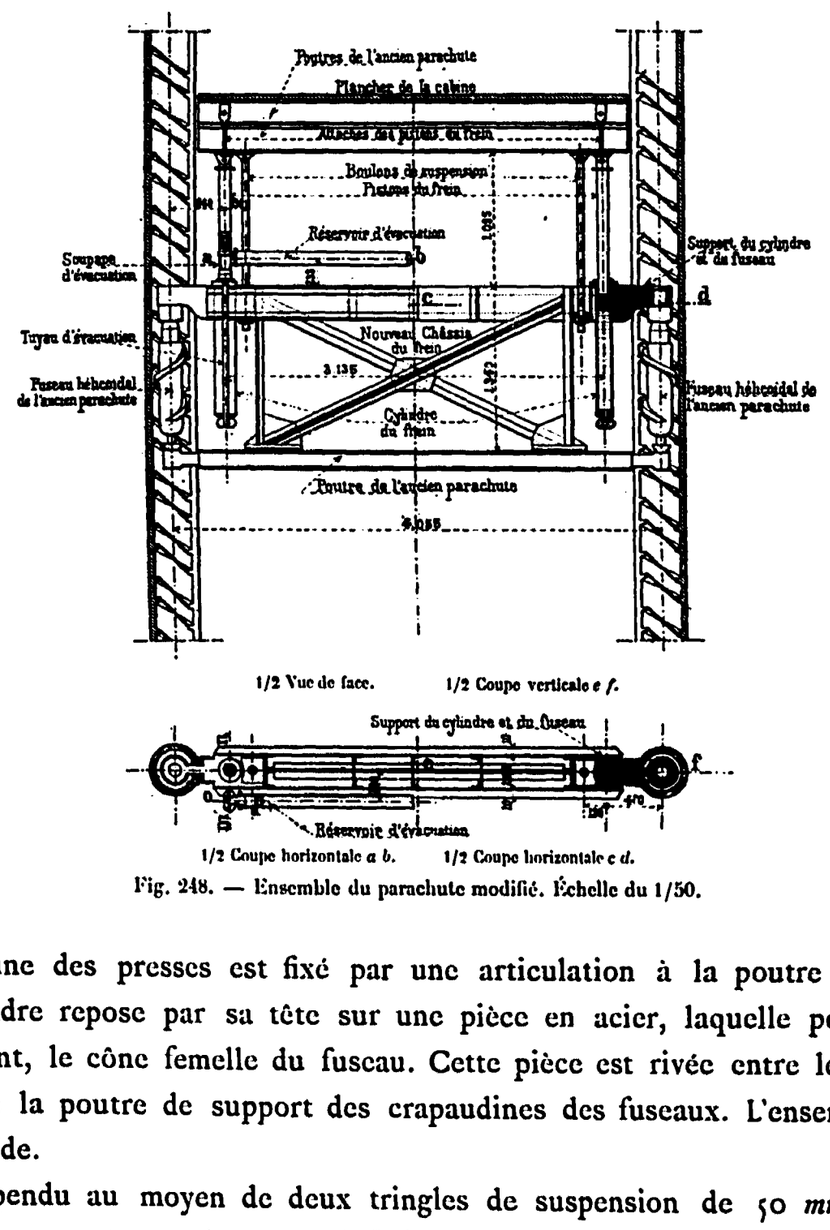


Fig. 248. — Ensemble du parachute modifié. Échelle du 1/50.

Le piston de chacune des presses est fixé par une articulation à la poutre inférieure de la cabine (Voir fig. 249). Le cylindre repose par sa tête sur une pièce en acier, laquelle porte en même temps, au moyen d'un prolongement, le cône femelle du fuseau. Cette pièce est rivée entre les âmes d'une poutre en caisson entretoisée avec la poutre de support des crapaudines des fuseaux. L'ensemble forme un nouveau châssis parfaitement rigide.

Le châssis est suspendu au moyen de deux tringles de suspension de 50 *mm* de diamètre, fixées à articulation par une chape portée par la poutre inférieure de la cabine. Ces tringles, lors de la rentrée du piston, peuvent glisser dans l'appui inférieur de manière à le suivre dans son mouvement.

Un tuyau en acier relie le bas de chaque cylindre hydraulique avec une soupape d'évacuation placée à l'extrémité du réservoir.

Le clapet de cette soupape a une forme particulière, de manière qu'à une levée déterminée correspondent une tension de ressort et un débit donnés.

Le fonctionnement du parachute est provoqué comme avant sa transformation par l'arrêt automatique des fuseaux à hélice dans les colonnes guides de l'ascenseur.

L'arrêt automatique se produit lorsque, l'accélération de la cabine devenant plus grande que celle du fuseau, les supports fixés à la cabine glissent dans les douilles en bronze inférieures et supérieures de ce fuseau ; le cône de friction vient alors coiffer le cône supérieur du fuseau et arrête la rotation de ce dernier. Le fuseau devenant fixe, toute la cabine continue à descendre, les pistons pénètrent dans les cylindres, en chassant dans le réservoir supérieur le liquide qui les remplissait et que l'on force à passer par

les soupapes d'évacuation, en créant une résistance qui absorbe progressivement la force vive. Les rondelles Belleville des fuseaux y concourent également pour une certaine part.

Dans ce mouvement, les tringles de suspension descendent avec la cabine, à travers la poutre supérieure du châssis.

L'accélération due à la chute du fuseau glissant sur son hélice est de 2,80 *m* au lieu de 9,81 *m* qu'il aurait en chute libre ; l'effort sur les différents organes correspondant à l'absorption de la puissance vive

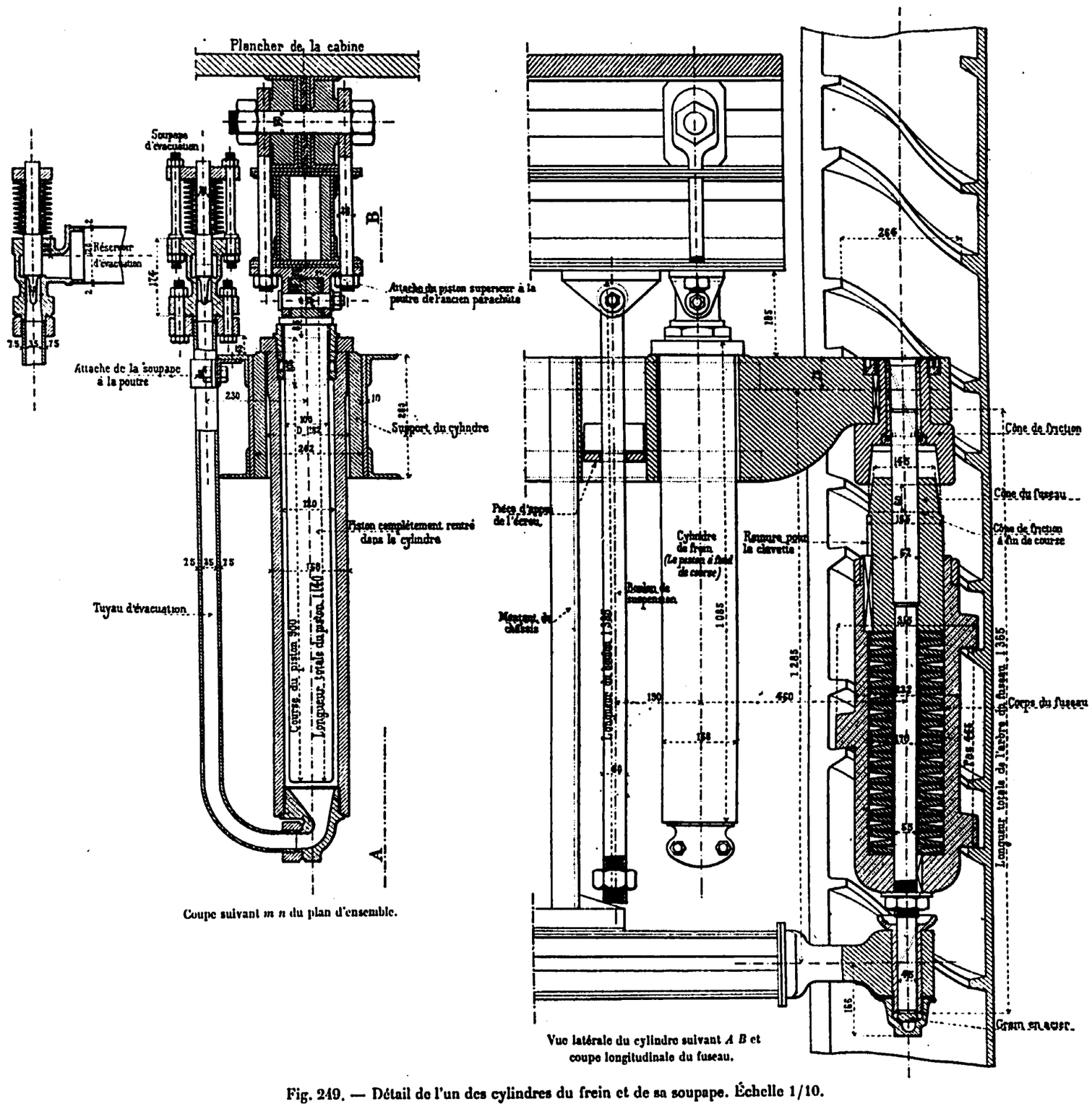


Fig. 249. — Détail de l'un des cylindres du frein et de sa soupape. Échelle 1/10.

pour une vitesse de 5 *m* ne dépasse pas 21.000 *kg* sur chacun des côtés de la cabine, effort pour lequel les divers organes ont été calculés, ainsi que nous l'avons vu pour l'ancien parachute.

§ 3. — Calculs du frein de sûreté hydraulique.

1° *Calcul de l'accélération g' du fuseau.*

Soient :

- P le poids total d'un fuseau ;
- M sa masse ;
- R le rayon moyen de l'hélice située à l'intérieur des colonnes en fonte ;
- Z le pas de cette hélice ;
- α l'inclinaison de la tangente à l'hélice sur l'horizontale, de telle sorte que $\operatorname{tg}\alpha = \frac{Z}{2\pi R}$;
- θ l'angle dont a tourné le fuseau pendant le temps t ;
- $\frac{d\theta}{dt}$ la vitesse angulaire de rotation du fuseau à l'instant t ;
- f le coefficient de frottement des deux surfaces hélicoïdales l'une sur l'autre que nous admettrons égal à 0,16 ;

m et r la masse et la distance à l'axe du fuseau d'un point quelconque de ce dernier, x, y, z, dont la distance angulaire au plan xz est 0;

K le rayon de giration du fuseau.

Prenons comme axes de coordonnées, 3 axes rectangulaires, l'axe des z étant l'axe du fuseau, les deux axes ox, oy deux droites quelconques perpendiculaires entre elles et perpendiculaires à oz.

Le fuseau est un système matériel de révolution, animé d'un mouvement de rotation autour de son axe de figure, et d'un mouvement de translation suivant cet axe.

Appliquons le théorème de la dérivée du moment de la quantité de mouvement qui s'énonce ainsi :

La dérivée de la somme des moments des quantités de mouvement de tous les points d'un système matériel animé d'un mouvement de rotation autour d'un axe, est égale à la somme des moments par rapport à cet axe, des forces extérieures appliquées au système.

On aura donc

$$d\Sigma m\left(x\frac{dy}{dt}-y\frac{dx}{dt}\right)=M_zF.$$

F étant la résultante des forces extérieures appliquées au fuseau, lesquelles sont son poids et les réactions de l'hélice.

Le poids se décompose en deux forces, l'une parallèle à la tangente à l'hélice, ayant comme valeur $P\sin\alpha$, et l'autre perpendiculaire, dont la valeur est $P\cos\alpha$. Cette dernière détermine en sens inverse de la première un frottement, qui en valeur absolue a pour valeur $Pf\cos\alpha$. La composition de ces deux forces donne donc une résultante

$$P\sin\alpha-Pf\cos\alpha,$$

dirigée suivant la tangente à l'hélice moyenne. Sa projection horizontale est

$$P(\sin\alpha-f\cos\alpha)\cos\alpha$$

et son moment par rapport à l'axe du fuseau est

$$PR(\sin\alpha-f\cos\alpha)\cos\alpha.$$

On a donc

$$(1)\qquad d\Sigma m\left(x\frac{dy}{dt}-y\frac{dx}{dt}\right)=PR(\sin\alpha-f\cos\alpha)\cos\alpha.$$

Or $x=r\cos\theta$, $y=r\sin\theta$,

d'où $\frac{dx}{dt}=-r\sin\theta\frac{d\theta}{dt}=-y\frac{d\theta}{dt}$ et $\frac{dy}{dt}=r\cos\theta\frac{d\theta}{dt}=x\frac{d\theta}{dt}$.

En reportant ces valeurs dans l'équation précédente, il vient :

$$d\Sigma m(x^2+y^2)\frac{d\theta}{dt}=PR(\sin\alpha-f\cos\alpha)\cos\alpha.$$

En observant que $x^2+y^2=r^2$, et que $\Sigma mr^2=MK^2$, l'équation devient :

$$MK^2\frac{d^2\theta}{dt^2}=PR(\sin\alpha-f\cos\alpha)\cos\alpha.$$

Pour exprimer que le fuseau en tournant descend sur une hélice de pas Z, nous poserons :

$$\frac{z}{\theta}=\frac{Z}{2\pi}\qquad\text{d'où}\qquad z=\frac{Z\theta}{2\pi}.$$

On en tire :

$$\frac{d^2z}{dt^2}=\frac{Z}{2\pi}\frac{d^2\theta}{dt^2}.$$

Or $\frac{d^2z}{dt^2}$ n'est autre que l'accélération g' cherchée ; on a donc

$$\frac{d^2\theta}{dt^2}=g'\frac{2\pi}{Z}.$$

En remplaçant $\frac{d^2\theta}{dt^2}$ par sa valeur dans l'équation précédente, il vient

$$g'=\frac{Z}{2\pi MK^2}PR(\sin\alpha-f\cos\alpha)\cos\alpha.$$

Comme $M=\frac{P}{g}$ et $Z=2\pi R\frac{\sin\alpha}{\cos\alpha}$, on a finalement :

$$g'=g\frac{R^2}{K^2}\sin\alpha(\sin\alpha-f\cos\alpha),$$

laquelle donne l'accélération cherchée g' en fonction de l'accélération due à la pesanteur.

La valeur de ce coefficient est la suivante :

$$R=0{,}153,\qquad K=0{,}10\qquad\text{d'où}\qquad\frac{R^2}{K^2}=\frac{0{,}0234}{0{,}01}=2{,}34.$$

$$\mathrm{Tg}\,\alpha=\frac{0{,}445}{0{,}9363}=0{,}475,\qquad\text{soit}\qquad\alpha=25°30',\qquad\sin\alpha=0{,}430,\qquad\cos\alpha=0{,}902.$$

Si $f=0{,}16$, $f\cos\alpha=0{,}144$, $\sin\alpha-f\cos\alpha=0{,}286$

$$0{,}286\times0{,}430=0{,}123.$$

Ce coefficient est ainsi

$$2{,}34\times0{,}123=0{,}288.$$

La valeur de g' est donc :

$$g'=g\times0{,}288=9{,}81\times0{,}288=2{,}80\ m.$$

2° *Étude dynamique du fonctionnement.*

Dans le *cas de la marche normale*, on voit que le frein ne peut pas embrayer à la descente, si l'accélération de la cabine est inférieure à g' à un moment quelconque.

Dans le cas d'*une rupture des câbles*, la cabine est abandonnée à elle-même et prend l'accélération g. Si V_0 est sa vitesse au moment de la rupture, au bout du temps t elle aura parcouru un espace

$$e=V_0t+\frac{1}{2}gt^2.$$

Le fuseau aura parcouru un espace

$$e'=V_0t+\frac{1}{2}g't^2.$$

La différence des espaces parcourus est :

$$e-e'=\frac{1}{2}(g-g')t^2\qquad\text{d'où}\qquad t=\sqrt{\frac{2(e-e')}{g-g'}}.$$

Quand la différence $e-e'$ sera égale à l'espace de 60 *mm* qui sépare les 2 cônes du fuseau, le frein commencera à agir.

En faisant dans la relation précédente $e-e'=0{,}06$

$$\text{et}\quad g-g'=9{,}81-2{,}80=7{,}01.$$

On aura : $$t=0'',132.$$

La vitesse de la cabine au moment de l'entrée en action du frein sera donc

$$V=V_0+gt.$$

Ou

$$V=V_0+9{,}81\times0{,}132=V_0+1{,}295.$$

Si l'on désigne par M la masse de la cabine, la puissance vive de celle-ci au moment de l'embrayage est donc

$$\frac{1}{2}M(V_0+1{,}295)^2.$$

Le parachute doit absorber cette puissance vive et le travail de la pesanteur pendant la durée du fonctionnement du frein.

Le travail total à absorber est donc :

$$\frac{1}{2}M(V_0+1{,}295)^2+PH=\frac{P}{2}\left(\frac{(V_0+1{,}295)^2}{g}+2H\right).$$

P est le poids de l'ensemble du véhicule, soit 16.500 *kg*, qui est composé comme suit :

Caisse et palonnier	6.800	8.700 *kg*
Parachute ancien	1.900	
Augmentation de poids du nouveau parachute	1.200	
Poids de l'impériale	1.000	
Surcharge de voyageurs, 80 à 70 *kg*	5.600	
Total	16.500 *kg*	

H est la course des freins hydrauliques, soit 0,90 *m*.

En supposant que toute la puissance vive soit absorbée par les freins et en négligeant l'action des ressorts Belleville, le travail absorbé sera de $F\times H$, en désignant par F l'effort constant qui agit sous les pistons et retarde le mouvement de descente de la cabine.

On a donc, en désignant par V la vitesse $V_0+1{,}295$, c'est-à-dire la vitesse de la cabine au moment du fonctionnement du frein :

$$\frac{P}{2}\left(\frac{V^2}{g}+2H\right)=FH\qquad\text{d'où}\qquad F=\frac{P}{2.H}\left(\frac{V^2}{g}+2H\right)=\frac{P}{2gH}V^2+P,$$

soit : $$F=934\,V^2+16.500.$$

En donnant successivement à V les valeurs 2 *m*, 3 *m*, ..., 6 *m*, on obtient la grandeur de l'effort correspondant sous les pistons de frein, et par suite toutes les données intéressant le fonctionnement des soupapes d'évacuation.

Le tableau suivant résume ces calculs numériques pour les différentes valeurs de V.

VITESSE V DE LA CABINE AU MOMENT DU FONCTIONNEMENT.	EFFORT F EXERCÉ PAR LES PISTONS SUR L'EAU DES CYLINDRES.	CHARGE PAR cm^2 SUR LES PISTONS. SECTION TOTALE : $78{,}5\times2=157\,cm^2$.	VITESSE D'ÉCOULEMENT DU LIQUIDE DUE A LA CHARGE.	ORIFICE DU CLAPET CORRESPONDANT A CETTE VITESSE D'ÉCOULEMENT.	
				SANS CONTRACTION.	AVEC CONTRACTION DE 50 p. 100.
m	*kg*	*kg*	*m*	cm^2	cm^2
2	20.240	129	$\sqrt{2\times9{,}81\times1.200}=159$	$\frac{78{,}5\times2}{159}=0{,}99$	1,98
3	24.010	158	$=170$	$\frac{78{,}5\times3}{170}=1{,}34$	2,68
4	31.440	200	$=198$	$=1{,}59$	3,18
5	39.350	253	$=223$	$=1{,}76$	3,52
6	50.120	319	$=250$	$=1{,}88$	3,76

Les chiffres de la 3e colonne ont permis de calculer la pression de soulèvement

des clapets des soupapes et de régler la tension des ressorts Belleville de ces soupapes, pour chacune des vitesses données. De même les chiffres de l'avant-dernière colonne ont servi à déterminer le profil du clapet, de manière qu'à une vitesse de cabine donnée corresponde la vitesse d'écoulement fournie par la 4e colonne.

D'après les chiffres de la 2e colonne, on voit que le frein peut fonctionner, sans danger pour les organes, jusqu'à une vitesse supérieure à 5 *m*. Nous avons vu, en effet, dans la description de l'ancien parachute, que les organes pour chacun des côtés du châssis étaient calculés pour un effort maximum de 21.000 *kg*.

§ 4. — Résultats des expériences comparatives pour l'ancienne et la nouvelle installation.

Des expériences de vitesse et de pression ont été faites avec la nouvelle installation.

Le procédé employé est le même que celui décrit à propos des expériences exécutées sur l'ancien appareil et avec les mêmes charges.

Nous donnons ci-dessous la comparaison des résultats obtenus avec les deux installations, dans tous les cas où les distributeurs étaient ouverts en grand.

1° Comparaison des vitesses.

Expérience n° 1. — Montée de la cabine A *chargée de 4.000 kg et cabine* B *vide.*

DÉSIGNATION.	VITESSE MOYENNE.	VITESSE MAXIMA.
	m	*m*
Ancienne installation	0,43	0,53
Nouvelle installation	0,53	0,62
Gain	0,10	0,09

Expérience n° 2. — Descente de la cabine A *vide et* B *chargée de 3.800 kg.*

DÉSIGNATION.	VITESSE MOYENNE.	VITESSE MAXIMA.
	m	*m*
Ancienne installation	0,38	0,83
Nouvelle installation	0,48	0,83
Gain	0,10	0,00

Expérience n° 3. — Cabine A *et cabine* B *chargées également. (Dans la nouvelle installation, la charge commune était de 6.000 kg.)*

DÉSIGNATION.	MONTÉE DE LA CABINE A.		DESCENTE DE LA CABINE A.	
	VITESSE MOYENNE.	VITESSE MAXIMA.	VITESSE MOYENNE.	VITESSE MAXIMA.
	m	*m*	*m*	*m*
Ancienne installation	0,76	0,90	0,77	1,11
Nouvelle installation	0,91	1,11	0,86	1,43
Gain	0,15	0,12	0,09	0,32

Il résulte des chiffres précédents que, dans tous les cas de charge, il y a augmentation dans la vitesse moyenne des pistons.

Cette augmentation est de 0,10 *m* dans le cas de charges non équilibrées et de 0,09 à 0,15 *m* pour le cas de l'équilibre.

En se basant sur les chiffres de l'expérience n° 3, qui correspond au service normal de l'exploitation, on voit que le trajet absolu aller et retour de la cabine A peut s'effectuer dans un temps qui correspond à 10 voyages à l'heure.

En effet, le temps de la montée de la cabine A est de $\frac{80,20}{0,91} = 88''$ et celui de la descente de $\frac{80,20}{0,86} = 94''$ soit en tout 182".

Il reste donc disponible pour les mouvements des voyageurs :

$$\frac{3.600}{10} - 182 = 178 \text{ secondes.}$$

Soit 100" pour les embarquements et débarquements aux stations extrêmes, et 78" pour le changement de voyageurs à l'étage intermédiaire.

2° Comparaison des pressions.

Expérience n° 1. — Montée de la cabine A *chargée de 4.000 kg et cabine* B *vide.*

DÉSIGNATION.	TÊTE DES CYLINDRES. PRESSION THÉORIQUE : 8 *kg* PAR cm².		BAS DU CYLINDRE. PRESSION THÉORIQUE : 16 *kg* PAR cm².	
	PRESSION OBSERVÉE.	PERTE DE CHARGE.	PRESSION OBSERVÉE.	PERTE DE CHARGE.
	kg	*kg*	*kg*	*kg*
Ancienne installation	6 — 7 — 6,7	2 — 1 — 1,3	14,2 — 14,3 — 14,5	1,8 — 1,7 — 1,5
Nouvelle installation	7,3 à 6,9	0,7 à 1,1	14,1 à 14,5	1,9 à 1,5
Gain ou perte	1,3 à 0,2		— 0,1 à 0,00	

Expérience n° 2. — Descente de la cabine A *vide et* B *chargée de 3.800 kg.*

DÉSIGNATION.	TÊTE DU CYLINDRE. CONTRE-PRESSION THÉORIQUE : 0,2 *kg*.		BAS DU CYLINDRE. CONTRE-PRESSION THÉORIQUE : 8,2 *kg*.	
	PRESSION OBSERVÉE.	PERTE DE CHARGE.	PRESSION OBSERVÉE.	PERTE DE CHARGE.
	kg	*kg*	*kg*	*kg*
Ancienne installation	0,5 — 0,2 — 0,2	0,3 à 0	9,2 — 9,0	1 à 0,8
Nouvelle installation	0,5 à 0,3	0,3 à 0,1	10 — 9,5	1,8 à 1,3
Gain ou perte	0 à — 0,1		— 0,8 à — 0,5	

Expérience n° 3. — Cabine A *et cabine* B *chargées également.*

DÉSIGNATION.	MONTÉE DE LA CABINE A.						DESCENTE DE LA CABINE A.			
	AVANT LE DISTRIBUTEUR PRESSION THÉORIQUE : 8 *kg*.		TÊTE DU CYLINDRE. PRESSION THÉORIQUE : 8 *ky*.		BAS DU CYLINDRE PRESSION THÉORIQUE : 16 *ky*.		TÊTE DU CYLINDRE. CONTRE-PRESSION THÉORIQUE : 0,2 *kg*.		BAS DU CYLINDRE. CONTRE-PRESSION THÉORIQUE : 8,2 *kg*.	
	PRESSION OBSERVÉE.	PERTE DE CHARGE.	PRESSION OBSERVÉE.	PERTE DE CHARGE.	PRESSION OBSERVÉE.	PERTE DE CHARGE.	PRESSION OBSERVÉE.	PERTE DE CHARGE.	PRESSION OBSERVÉE.	PERTE DE CHARGE.
	kg	*kg*	*kg*	*kg*	*kg*	*kg*	*kg*	*kg*	*kg*	*kg*
Ancienne installation.	7,5 — 7,5	0,5	5 — 5,8 — 4	3 — 2,2 — 4	12,5 — 13	3,5 — 3	3 — 1,5 — 2	2,8 — 1,3 — 1,8	11 — 10,8 — 11	2,8 — 1,6 — 2,8
Nouvelle installation.	8 à 7,6	0 à 0,4	6,5 à 5,5	1,5 à 2,5	12 à 12,2	4 à 3,8	1,5 à 0,7	1,3 à 0,5	11 à 11,25	2,8 à 3,5
Gain ou perte.....	0,5 à 0,1		1,5		— 0,5 à — 0,8		1,5 à 1,3		0 à — 0,25	

Des tableaux précédents, on conclut que le changement de la conduite du 3° à l'intermédiaire et ceux du distributeur et de la tête des cylindres ont eu pour effet de diminuer d'une façon sensible les pertes de charges dans ces diverses parties. Cette diminution atteint jusqu'à 1,5 *kg* dans le cas de la montée en charge équilibrée de la cabine A.

Au contraire, la perte de charge à l'intérieur des cylindres augmente en général, par suite de l'accroissement de la vitesse qui donne un plus grand frottement de l'eau entre les parois des plongeurs et des cylindres.

§ 5. — Résumé des principales données relatives à l'ascenseur transformé et des calculs dynamiques.

Les données relatives à l'ancien ascenseur, et qui sont exposées aux pages 175, 187 et 189 de cet ouvrage subsistent, pour le nouvel ascenseur; nous les résumons ci-dessous :

Poids des pistons		17.500 *kg*
Poids des câbles d'enroulement situés du côté de la cabine motrice à fin de course		1.047
Poids par mètre des quatre câbles d'enroulement $p =$		76
Poids total des câbles de suspension du côté de la cabine contrepoids		5.802
Pression théorique à la montée en mètres d'eau	En bas de la course	159,90 *m*
	En haut de la course	79,70
Contre-pression théorique à la descente, en mètres d'eau	En haut de la course	3,20
	En bas de la course	83,40
Course H des cabines		80,20
Poids ancien de la cabine contrepoids	8.700	
Poids de l'impériale	1.000	
Poids du nouveau frein	1.200	
Poids de la cabine contrepoids à vide		10.900 *kg*
Poids de quatre-vingt voyageurs à 70 kilogrammes		5.600
Poids de la cabine pleine		16.500

Le poids mort de la cabine motrice sera, par une addition convenable de lest, rendu égal à celui de la cabine contrepoids.

Détermination de la pression effective.

Nous calculerons successivement dans le cas de la montée de la cabine motrice, et dans le cas de la descente, l'effort moteur et l'effort résistant que nous comparerons.

1° Cas de la montée de la cabine motrice.

Pour avoir la pression effective, il faut déterminer les pertes de charge, dans les différentes parties de l'appareil.

Ces pertes de charge sont résumées dans le tableau suivant pour les trois vitesses de la cabine de 0,45 *m*, 1 *m* et 1,25 *m*.

DÉSIGNATION.	VITESSE DE LA CABINE.		
	0,45	1 *m*	1,25
	kg/cm²	*kg/cm²*	*kg/cm²*
1° Perte de charge dans la conduite de 250 *mm* allant du réservoir du 3° à l'étage intermédiaire	0,021	0,352	0,604
2° d° dans la conduite du distributeur aux cylindres	0,021	0,102	0,160
3° d° dans le distributeur Otis	0,067	0,330	0,500
4° d° dans le cylindre lui-même, au commencement de la course	0,180	0,890	1,388
A la fin de la course	0,000	0,000	0,000
Total des pertes de charge :			
Au commencement de la course	0,289	1,674	2,742
A la fin de la course	0,109	0,784	1,354

Ces pertes de charge rapportées à la section des plongeurs, laquelle est de 0,1608 m^2, donnent les chiffres suivants :

	COMMENCEMENT DE LA COURSE.	FIN DE LA COURSE.
Vitesse de 0,45 *m*....	464 *kg*	175 *kg*
— de 1,00 *m*....	2.685	1.254
— de 1,25 *m*....	4.405	2.166

La pression théorique rapportée à la section du plongeur est :

Au commencement de la course : $1608 \times \frac{159,9}{10} = 25.712\ kg.$

A la fin de la course : $1608 \times \frac{79,70}{10} = 12.816\ kg.$

Les pressions effectives ou efforts moteurs pour les différentes vitesses sont donc :

	COMMENCEMENT DE LA COURSE.	FIN DE LA COURSE.
Vitesse de 0,45 *m*....	25.712 — 464 = 25.248 *kg*	12.816 — 175 = 12.641 *kg*
— de 1,00 *m*....	25.712 — 2.685 = 23.027	12.816 — 1.254 = 11.562
— de 1,25 *m*....	25.712 — 4.405 = 21.307	12.816 — 2.166 = 10.650

Pour chacune de ces vitesses on peut représenter graphiquement la variation

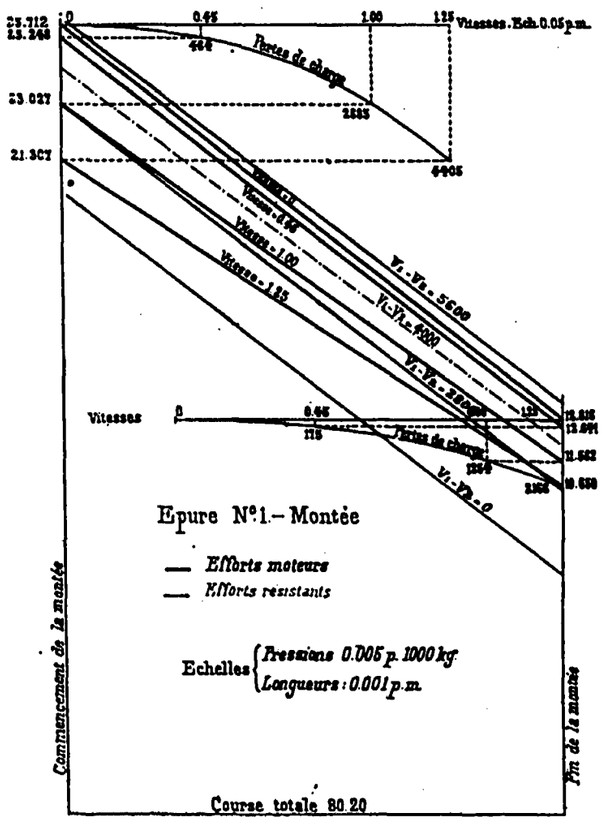


Fig. 250.

de la pression effective, du commencement à la fin de la course (Voir épure, fig. 250).

Équilibre du système.

La pression motrice, abstraction faite des pertes de charge, doit être égale en chaque point de la course à l'effort résistant.

L'équation d'équilibre s'établit comme suit.

Les forces produisant le mouvement sont au commencement de la course :

1° La pression effective donnée par le tableau précédent pour les différentes vitesses, soit Q.

2° Le poids des câbles de suspension y compris chapes et tendeurs, c'est-à-dire ceux ne s'enroulant pas sur les poulies ; il est égal à 5.802 *kg*.

3° Le poids de la cabine contrepoids qui s'élimine par suite de son égalité avec celui de la cabine motrice.

4° Le poids des voyageurs de la cabine contrepoids, soit V_2, pouvant varier de 0 à 5.600 *kg*.

Les forces s'opposant au mouvement sont :

1° La somme P_1 des poids des pistons et des câbles, $P = 17.500 + 1.047 = 18.547$.

2° Le poids C_1 de la cabine motrice, qui s'élimine ;

3° Le poids V_1 des voyageurs de la cabine motrice pouvant varier de 0 à 5.600 *kg*.

4° Le poids pH de la portion des câbles s'enroulant sur les poulies

$$p\,H = 76 \times 80,20 = 6.095\ kg.$$

5° La somme R des résistances dues au frottement, laquelle, d'après les expériences faites antérieurement, est à la montée d'environ 1.400 *kg* avec les nouveaux poids.

Pour le mouvement, on doit avoir :

$$Q + 5.802 + V_2 > 18.547 + V_1 + 6.095 + 1.400$$

d'où

$$Q > 20.240 + (V_1 - V_2).$$

A la fin de la course on aurait de même, en remarquant que les câbles d'enroulement viennent s'ajouter à la force ascensionnelle :

$$Q' + 5.802 + 6.095 + V_2 > 18.547 + V_1 + 1.400$$

d'où

$$Q' > 8.050 + (V_1 - V_2)$$

En donnant successivement à $V_1 - V_2$ les valeurs correspondantes :

1° A la cabine motrice complètement chargée et l'autre vide, soit

$$V_1 = 5.600\ kg,\ V_2 = 0 \text{ et } V_1 - V_2 = 5.600\ kg\ ;$$

2° A la cabine motrice complètement chargée, et l'autre à moitié pleine, soit

$$V_1 = 5.600,\ V_2 = 2.800,\ V_1 - V_2 = 2.800\ ;$$

3° Aux deux cabines également chargées, soit $V_1 - V_2 = 0$;

on trouve les valeurs ci-dessous :

VALEURS DE $V_1 - V_2$.	EFFORT RÉSISTANT MAXIMUM Q. COMMENCEMENT DE LA MONTÉE.	EFFORT RÉSISTANT MAXIMUM Q'. FIN DE LA MONTÉE.
kg		
5.600	25.840	13.650
2.800	23.040	10.850
0	20.240	8.050

Ces valeurs sont à comparer avec les pressions effectives du tableau précédent.

En reportant ces valeurs sur l'épure, on voit que :

1° Dans le cas de la cabine motrice seule chargée de 5.600 *kg*, la pression est insuffisante pour que le véhicule puisse monter, l'effort résistant étant constamment supérieur à la pression statique qui correspond à la vitesse 0.

Mais ce cas ne peut se présenter que dans les premiers voyages. Dès que la différence du poids des voyageurs est de 4.000 *kg*, c'est-à-dire quand il se présente 80 voyageurs à la montée pesant 5.600 *kg* et 23 voyageurs à la descente, soit 1.600 *kg*, ou seulement 57 voyageurs à la montée, on voit d'après l'épure que l'effort résistant est compris entre les efforts moteurs correspondants à la vitesse de 0,45 *m* et à celle de 1,00 *m* ; la vitesse réelle varie de 0,80 pour le commencement de la course à 0,85 pour la fin.

2° Lorsque la différence de poids $V_1 - V_2$ du côté de la cabine motrice est de 2.800 *kg*, la vitesse au démarrage est un peu au-dessus de 1,00 *m* ; elle atteint près de 1,25 *m* à la fin de la course.

3° Lorsque les cabines sont également chargées, la vitesse dépasse 1,25 *m*.

2° Cas de la descente.

Détermination de la contre-pression. — Nous suivrons la même marche de calcul pour la descente.

Nous calculerons, tout d'abord, les pertes de charge, qui sont extraites du tableau précédent, correspondant aux différentes vitesses de la cabine motrice.

DÉSIGNATION.	VITESSE DE LA CABINE.		
	0,45 *m*	1 *m*	1,25 *m*
	kg/cm²	*kg/cm²*	*kg/cm²*
Perte de charge dans la conduite du distributeur aux cylindres.....	0,021	0,102	0,160
d° dans le distributeur Otis.....	0,067	0,330	0,500
d° dans le cylindre lui-même à la fin de la descente de la cabine motrice.....	0,180	0,890	1,388
Au commencement de la descente.....	0,000	0,000	0,000
Total des pertes de charge :			
Au commencement de la descente.....	0,088	0,432	0,660
A la fin de la descente.....	0,268	1,322	2,048

Ces pertes de charge rapportées à la section des plongeurs donnent les chiffres suivants :

	COMMENCEMENT DE LA DESCENTE.	FIN DE LA DESCENTE.
Vitesse de 0,45 *m*....	141 *kg*	441 *kg*
— de 1,00 *m*....	695	2.122
— de 1,25 *m*....	1.061	3.296

La contre-pression théorique, rapportée à la section du plongeur 1608 cm^2, donne :

Commencement de la descente..... $1608 \times \frac{3,20}{10} = 514\ kg.$

Fin de la descente..... $1608 \times \frac{83,40}{10} = 13.410\ kg.$

Les contre-pressions effectives ou efforts résistants pour les différentes vitesses, et qui s'opposent au mouvement, seront donc :

	COMMENCEMENT DE LA DESCENTE.	FIN DE LA DESCENTE.
Vitesse de 0,45.....	514 + 141 = 655	13.410 + 441 = 13.851
— 1,00.....	514 + 695 = 1.209	13.410 + 2.122 = 15.532
— 1,26.....	514 + 1.061 = 1.575	13.410 + 3.290 = 16.706

Ces valeurs peuvent être rapportées sur une épure analogue à la précédente, qui donnera pour chacune des valeurs ci-dessus la variation de la contre-pression effective (Voir fig. 251).

Epure N°2. Descente

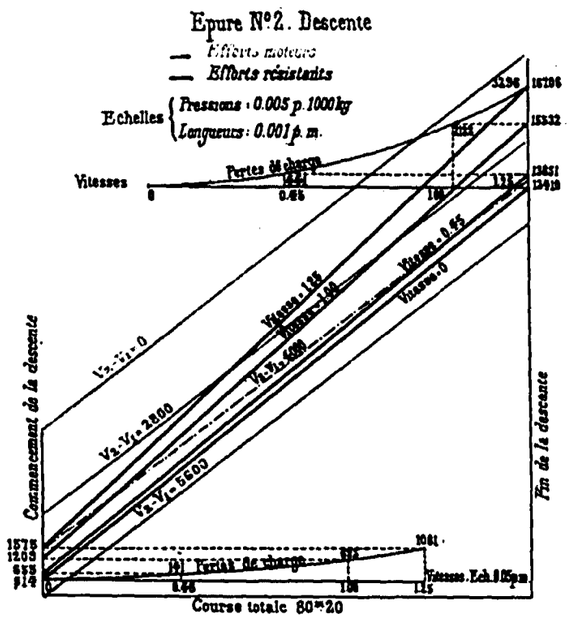


Fig. 251.

L'équation d'équilibre s'établit comme suit.

Au commencement de la descente, les forces qui produisent le mouvement sont :
1° Le poids des pistons et de leur surcharge P = 18.547 ;
2° Le poids V_1 des voyageurs de la cabine motrice variant de 0 à 5.600 *kg*.

Les forces qui s'opposent au mouvement sont :
1° Le poids des voyageurs de la cabine contrepoids $V_2 = 0$ à 5.600 *kg* ;
2° Le poids des câbles ne s'enroulant pas sur les poulies : 5.802 *kg* ;
3° Le poids des câbles s'enroulant sur les poulies : $pH = 6.095\ kg$;
4° La contre-pression Q ;
5° La somme des résistances passives dues au frottement et que nous prendrons égale à 1.200 *kg*.

On doit donc avoir pour qu'il y ait mouvement :

$$18.547 + V_1 > V_2 + 5.802 + 6.095 + Q + 1.200$$

d'où

$$Q > 5.450 - (V_2 - V_1).$$

A la fin de la descente, on aurait de même, en remarquant que les câbles d'enroulement viennent s'ajouter aux forces qui produisent la descente :

$$18.547 + 6.095 + V_1 > V_2 + 5.802 + Q' + 1.200$$

d'où

$$Q' < 17.640 - (V_2 - V_1).$$

En prenant les hypothèses précédentes, mais relativement à la cabine contrepoids, on a le tableau suivant :

VALEURS DE $V_1 - V_2$.	EFFORT MOTEUR Q AU COMMENCEMENT DE LA DESCENTE.	EFFORT MOTEUR Q' A LA FIN DE LA DESCENTE.
kg		
5.600	(— 150)	12.040
2.800	2.650	14.840
0	5.450	17.640

Ces valeurs sont à comparer avec les contre-pressions effectives du tableau précédent.

En reportant ces valeurs sur l'épure relative à la descente (Voir fig. 251), on voit que :

1° Dans le cas de la cabine contrepoids seule, chargée au maximum, la descente de la cabine motrice ne peut pas s'effectuer. Il faut, pour le premier voyage de la cabine contrepoids, ne mettre dans celle-ci que 58 à 60 voyageurs, représentant environ 4.000 *kg*. Dans ce cas, la cabine motrice descend avec une vitesse qui varie du commencement à la fin de la descente de 1,10 à 0,45, comme le montre le trait mixte de l'épure.

2° Lorsque la différence de poids $V_2 - V_1$ du côté de la cabine contrepoids est de 2.800 *kg*, la descente commence à une vitesse supérieure à 1,25 *m* ; elle atteint cette valeur après 27 *m* de course environ et décroît jusqu'à une valeur un peu inférieure à 1,00 *m*.

3° Enfin, lorsque les cabines sont également chargées, la vitesse reste, pendant toute la descente, supérieure à 1,25 *m*.

Il résulte de la discussion précédente :

1° Que la différence de poids des voyageurs dans les cabines ne doit pas dépasser 4.000 *kg*.

Quand elle atteint ce chiffre du côté de la cabine motrice, la marche s'effectue avec une vitesse moyenne de 0,80. Pour la descente, et quand cette surcharge de 4.000 *kg* est du côté de la cabine contrepoids, la vitesse est en moyenne de 0,75 *m*.

2° Quand cette différence est de 2.800 *kg*, soit de 40 voyageurs du côté de la cabine motrice, la vitesse à la montée est en moyenne de 1,10 *m*. Pour la descente et quand cette surcharge de 2.800 *kg* est du côté de la cabine contrepoids, la vitesse est en moyenne de 1,10 *m*.

3° Quand les cabines sont également chargées, la vitesse est supérieure à 1,25 *m* à la montée comme à la descente.

Il suit de là que dans le courant de la journée on peut utiliser l'appareil pour les cabines chargées soit d'un nombre égal de voyageurs allant jusqu'à 80, soit de nombres pouvant différer entre eux de 58.

Au commencement de la journée, la marche de l'appareil exige que l'on admette seulement ce nombre de 58, au-dessus duquel la montée de la cabine contrepoids ne se produirait que trop lentement.

A la fin de la journée, quand il ne se produit que des descentes de voyageurs, il est prudent d'en limiter le nombre à 58, une ouverture exagérée du distributeur pouvant donner lieu à un excès de vitesse.

La durée complète d'un voyage est estimée à 6 minutes, dont 3 minutes pour le parcours à raison d'une vitesse moyenne de 0,60 et 3 minutes pour les changements de voyageurs.

CHAPITRE VI

ESCALIERS

§ 1. — Escaliers des piliers Est et Ouest.

Ces deux escaliers allant du sol à la 1re plate-forme ont été modifiés à leur départ du sol, en raison de l'existence des accumulateurs des nouveaux ascenseurs, lesquels pendant leur course de montée viennent occuper l'emplacement des anciens escaliers.

La volée de départ contourne l'emplacement des accumulateurs et à une hauteur d'environ 6 *m* vient rejoindre l'ancien escalier. Cette disposition est représentée pour le pilier Ouest dans les figures 12 et 13 de la planche XLVI

§ 2. — Escalier du pilier Sud.

Cet escalier est destiné à la descente à pied des voyageurs du 1er étage au sol et à la montée du 1er au 2e étage, la montée du sol au 1er étage continuant à se faire par les deux escaliers des piles Est et Ouest.

Le nouvel escalier, dont la disposition générale est intéressante, est établi entre les poutres de l'ancien ascenseur Otis, sur lesquelles il s'appuie en projetant à porte-à-faux les volées alternatives qui se contrebutent l'une par l'autre.

Il est composé d'une série de révolutions dont chacune comprend une grande et une petite volée. La figure 252 représente le schéma de l'une de ces révolutions.

Les paliers P_1 sont attachés aux poutres de l'ascenseur dont l'écartement d'axe en axe est de 3,80 *m*. De

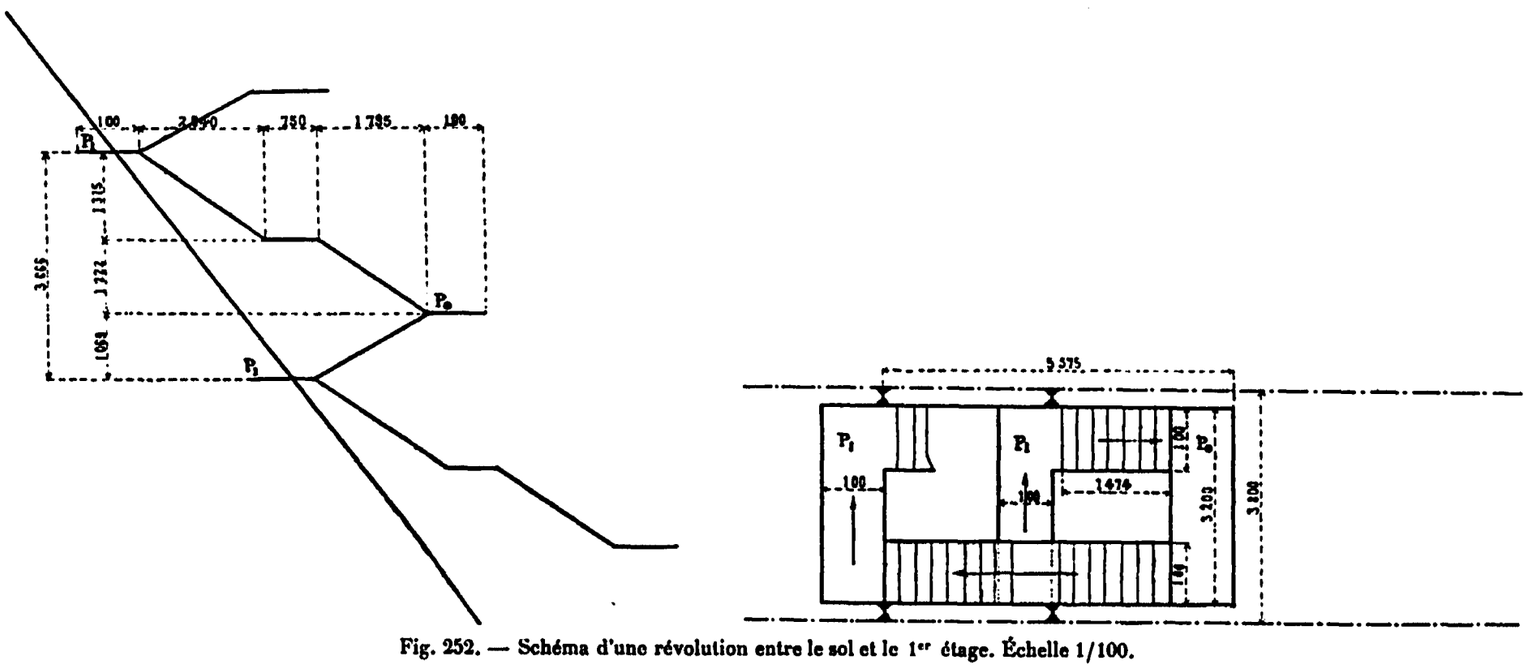


Fig. 252. — Schéma d'une révolution entre le sol et le 1er étage. Échelle 1/100.

ce palier part une petite volée aboutissant à un palier P_0, extérieur aux poutres, duquel part la grande volée qui rejoint le palier P_1 suivant, et ainsi de suite.

Pour la partie du sol au 1er, l'escalier et les paliers ont 1,00 *m* de largeur et la grande volée porte un palier intermédiaire avec des contremarches ayant une hauteur commune de 152,7 *mm*. Les marches sont en chêne et garnies d'une bandelette de fer. Chacun des paliers en porte-à-faux P_0 s'appuie sur le palier inférieur P_1, d'abord par la petite volée, puis par une contre-fiche placée dans le plan du limon extérieur

de la grande volée. Quant aux paliers P_1, ils sont attachés directement sur les poutres de l'ascenseur (Voir fig. 253).

Du sol au 1er étage il existe 14 révolutions de 3,666 *m* de hauteur comprenant 24 marches, plus une volée de départ au sol, de 21 marches, et une volée d'arrivée de 7 marches, soit en tout 364 marches.

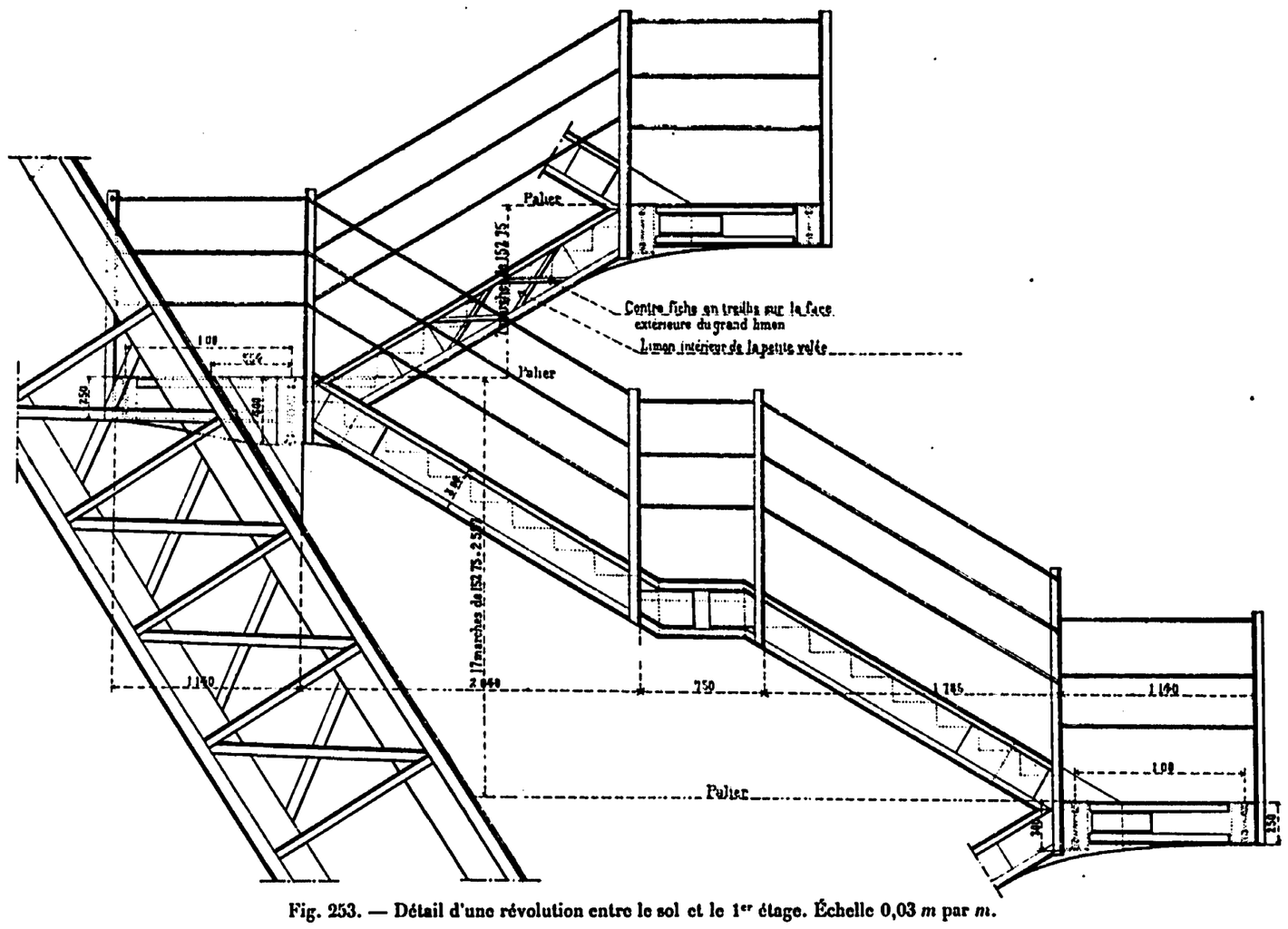


Fig. 253. — Détail d'une révolution entre le sol et le 1er étage. Échelle 0,03 *m* par *m*.

Pour la partie du 1er au 2e étage dont la largeur est de 1,50 *m* et dont les grandes volées n'ont pas de paliers, les révolutions, au nombre de 15, ont également 3,666 *m* de hauteur comprenant 24 marches de 152,7 *mm*; mais la largeur de celles-ci diffère suivant la position de la révolution sur le chemin. La volée de départ au 1er étage comprend 14 marches et celle de l'arrivée au 2e en comprend 7, ce qui donne entre le 1er et le 2e 381 marches.

Le nombre total des marches entre le sol et le 2e est donc de 745.

Cet escalier nouveau remplace, en offrant beaucoup plus de commodités, les anciens escaliers hélicoïdaux placés dans chacun des piliers, lesquels ne sont plus accessibles au public.

CHAPITRE VII

MACHINES & CHAUDIÈRES

La disposition nouvelle de la salle des machines est représentée à la figure 14 de la planche XLVI.
Les machines sont classées en trois catégories :
Pompes Worthington pour les ascenseurs et les restaurants.
Groupes électrogènes pour l'éclairage et l'illumination.
Condenseurs de ces diverses machines.

§ 1. — Pompes Worthington.

Ascenseurs Fives-Lille. — L'alimentation des deux ascenseurs Fives-Lille est faite par deux pompes Worthington marquées 14 et 15, analogues comme système à celles déjà décrites au chapitre VI de la 4e partie, mais d'une plus grande puissance.

Une seule de ces pompes fonctionne en service normal, l'autre étant une machine de secours.

Le moteur à vapeur à triple expansion de chaque machine a ses trois cylindres en tandem.

Diamètres des cylindres à vapeur.	305,457 et 737 *mm.*
Diamètre des quatre plongeurs.	165 *mm.*
Course commune.	457 *mm.*

La pression d'admission est environ de 10 *kg* dans le petit cylindre.

Nous avons vu dans la description de l'ascenseur qu'en marche normale l'aspiration se fait à une pression de 18 *kg* mesurée à l'accumulateur BP, et que le refoulement se fait à celle de 52 *kg* mesurée aux accumulateurs HP, soit avec un écart de 34 *kg*.

Les pompes ont été établies, afin de tenir compte de toutes les pertes de charge, de manière à pouvoir fonctionner sous des pressions de 10 et 55 *kg* mesurées sur les machines elles-mêmes, soit avec un écart de 45 *kg*.

Leur débit a été calculé à raison de 4.500 *l* par voyage de chacun des deux ascenseurs, soit pour 20 voyages à l'heure 90.000 *l* correspondant à 1.500 *l* par minute.

La consommation réelle des ascenseurs étant seulement de 4.080 *l*, les 20 voyages prendront 81.600 *l* et la vitesse pourra être inférieure à celle calculée et qui est la suivante.

En admettant pour les plongeurs une vitesse de 30 *m* par minute, le nombre de coups correspondant à une double course de 0,457 *m* est de $\frac{30}{2 \times 0{,}457} = 33$ coups.

La puissance de ces machines avec l'écart de 45 *kg* est de $\frac{1.500 \times 450}{60 \times 75} = 150$ chevaux.

En marche courante, cette puissance ne sera pas atteinte en raison des réductions sur le débit et sur l'écart de pression.

La consommation de vapeur par cheval-heure en eau montée (non compris purges et enveloppes de vapeur) ne doit pas, d'après le marché passé avec la maison Worthington, excéder le chiffre de 11 *kg*.

Le remplissage des accumulateurs à basse pression est fait au moment de la mise en marche de l'appareil par deux petites pompes dont l'une de rechange. Chacune est constituée par deux cylindres à haute pression de

114 *mm* de diamètre et de deux plongeurs à double effet de 51 *mm* de diamètre. Leur course commune est de 102 *mm*.

Leur puissance est de 2 chevaux environ et leur débit de 60 *l* par minute. Elles peuvent remplir un accumulateur à basse pression en une heure et demie.

Ascenseur Edoux. — L'ascenseur Edoux devant pouvoir faire un nombre de voyages plus grand qu'en 1889, soit 10 au lieu de 7, on a dû augmenter la puissance de ses pompes. Chacune des deux anciennes pompes a un débit de 1.100 *l* et en marchant simultanément elles pouvaient réaliser le débit nécessaire pour 10 voyages de 12.896 *l*; mais comme il était indispensable d'avoir une machine de secours, le groupe a été complété par une nouvelle pompe portant le n° 11 sur la figure 14.

Cette pompe est à triple expansion comme les précédentes.

Diamètres des pistons moteurs	203, 305, 508 *mm*
Diamètre des plongeurs.	178 *mm*
Course commune.	381 *mm*

Avec un nombre de 40 coups, le débit doit être de 1.300 *l*. L'aspiration est de 170 *m* et le refoulement de 318 *m*, y compris pertes de charge, donnant un écart de 148 *m*. Ces nombres sont établis en partant des hauteurs réelles, soit 200 *m* à l'aspiration et 278 *m* au refoulement et en comptant 30 *m* de perte de charge à l'aspiration et 40 *m* au refoulement.

La puissance de cette machine est de $\frac{1.300 \times 148}{60 \times 75} = 42{,}75$ chevaux.

En la joignant à l'une des deux anciennes, on a un débit total de 1.100 + 1.300 = 2.400 *l*, soit 144.000 *l* à l'heure. A raison de 12.896 *l* par voyage, on peut faire largement 10 voyages à l'heure.

La consommation de vapeur par cheval-heure en eau montée ne doit pas, d'après le marché, dépasser 14 *kg*.

Ascenseur Otis. — Le nouvel ascenseur Otis est alimenté par deux nouvelles pompes portant les n^os^ 18 et 19.

La première, qui porte le n° 18, est une pompe semblable à la précédente portant le n° 11.

L'aspiration se fait dans une bâche à 2 *m* de profondeur et refoule dans un réservoir placé à 121 *m* avec une perte de charge de 10 *m*. Le débit est de 1.400 *l* par minute.

La consommation de vapeur en eau montée (non compris les purges et les enveloppes de vapeur) est de 14 *kg* d'après le marché.

La puissance en chevaux est de $\frac{133 \times 1.400}{60 \times 75} = 41{,}3$ chevaux.

La seconde, qui porte le n° 19, est capable d'élever 750 *l* à la minute dans les mêmes conditions que la précédente, soit avec 131 *m* de charge :

Diamètres des cylindres.	133, 203, 356 *mm*.
Diamètre des plongeurs	140
Course commune.	254
Puissance en chevaux	$\frac{133 \times 750}{60 \times 75} = 22$ chevaux.
Consommation de vapeur	16 *kg* par cheval.

En faisant marcher simultanément les deux pompes, le débit total sera de 1.400 + 750 = 2.150 *l* par minute, soit par heure 129.000 *l*.

La consommation d'eau par voyage étant de 6.974 *l*, on pourra effectuer un nombre de $\frac{129.000}{6.974} = 18{,}5$ voyages, lequel sera certainement au-dessus des besoins. On n'en prévoit en effet que 14 à 15.

Alimentation des restaurants. — Comme dernière pompe, il n'y a plus à signaler que celle relative à l'alimentation en eau de source, portant le n° 13, qui a été installée en 1889 pour le service des restaurants.

§ 2. — Groupe électrogène.

Le courant électrique pour l'éclairage, les illuminations et l'embrasement est fourni par quatre groupes électrogènes, savoir :

a) Deux groupes formés chacun d'un moteur pilon Carels de 340 chevaux (nos 24 et 25) faisant 325 tours et actionnant une dynamo Sautter de 230.000 watts qui lui est reliée par un accouplement Zodel.

b) Deux groupes formés chacun des anciens moteurs pilons compound, type Sautter, de 70 chevaux, faisant 300 tours et actionnant chacun une dynamo nouvelle de 50.000 watts (nos 26 et 27).

En service normal, un moteur Carels et un moteur Sautter fonctionnent ensemble et suffisent à assurer le service, les deux moteurs restant servant comme secours.

§ 3. — Condenseurs.

La vapeur de tous les moteurs est condensée par deux grands condenseurs Worthington de 6.000 *kg* de vapeur chacun, et par les deux condenseurs déjà existants et dont chacun est capable de condenser 1.200 *kg* de vapeur.

Chacun des grands condenseurs compound est vertical et a les dimensions suivantes :

Diamètres des cylindres.	229, 406 *mm*.
Diamètre des pistons de la pompe à air.	508
Course commune.	305

Aspiration dans un bac à 1,50 *m* et refoulement dans un réservoir à 3 *m* de hauteur.

La puissance de chacun des nouveaux condenseurs est de 7 chevaux environ.

Chacun d'eux est destiné à condenser la vapeur de :

Une pompe pour les ascenseurs Fives-Lille.

Deux pompes pour l'ascenseur Edoux (les pompes anciennes sont compound et consomment 24 *kg* par cheval-heure ; leur puissance est de 36 chevaux).

Une pompe pour l'ascenseur Otis.

Une pompe pour l'alimentation des restaurants.

C'est-à-dire toute la vapeur des pompes fonctionnant simultanément.

Le second groupe de condenseurs servira aux groupes électrogènes.

Il y aura simultanément en fonction un groupe de condenseurs de 6.000 *kg* et un autre de 1.200.

§ 4. — Générateurs.

Aux quatre générateurs Collet et Niclausse, produisant chacun 1.500 *kg* de vapeur à l'heure, on a ajouté deux chaudières Babcok et Wilcox vaporisant chacune 2.000 *kg* d'eau à la pression de 12 *kg* (nos 1 et 2).

La production totale possible de vapeur à l'heure est donc de 10.000 *kg*.

Les générateurs sont alimentés par les deux petits chevaux de l'ancienne installation et en outre par un troisième du type Worthington (n° 9).

Devant les générateurs est installée une voie de roulement pour les wagonnets qui prennent le coke dans une soute ménagée dans l'un des angles de la pile.

On fera marcher dans la journée les deux chaudières Babcok et une chaudière Collet; le soir, une chaudière Collet en plus. La production de vapeur à 12 *kg* de pression sera ainsi de 5.500 *kg* dans la journée, ce qui correspond à un service régulier de 600 chevaux environ.

Les consommations, par journée de 12 heures, sont établies comme suit :

Pour l'eau servant à la condensation, on a prévu un poids égal à 20 fois celui de la vapeur condensée. Ce poids de vapeur étant estimé pour une pleine journée d'Exposition à 63.800 *kg*, le poids d'eau servant à la condensation sera de 1.276.000 *kg* par jour.

Cette eau étant payée à la Ville 0,125 *fr* le mètre cube, la dépense journalière pendant l'Exposition sera de $1.276 \times 0{,}125 = 159{,}50$ *fr*.

Pour le coke, la consommation est prévue à 7 *kg* par *kg* d'eau vaporisée. Cette consommation pour une journée de l'Exposition sera ainsi de $\frac{63.800}{7} = 9.100$ *kg*.

Le coke étant estimé à 33,50 *fr* la tonne, la dépense journalière de combustible peut être prévue à $9.100 \times 33{,}50 = 304{,}85$ *fr*.

La dépense totale journalière en eau, combustible et matières d'entretien, sera donc en moyenne de 500 *fr* environ.

§ 5. — Résumé de la puissance totale de l'installation mécanique.

La salle des machines telle que nous venons de la décrire comporte avec ses rechanges un ensemble de machines capable de développer une puissance de 1.332 chevaux, suivant détail ci-dessous :

1° Pompes Worthington.

		Litres.		Chevaux.		Chevaux.
Deux pour l'ascenseur Fives-Lille	Débit :	1.500	Puissance :	150	Soit :	300
Deux de remplissage d°		60		2		4
Une nouvelle pour l'ascenseur Edoux		1.300		42,75		43
Deux anciennes —		1.100		36		72
Une pour l'ascenseur Otis		1.400		41		41
— —		750		22		22
Une pompe à eau douce		»		2		2
Total pour les pompes						484

2° Groupes électrogènes.

Deux moteurs Carels à 340 chevaux	680
Deux moteurs Sautter à 70 chevaux	140
Un moteur pour éclairage de jour de 10 chevaux	10
Total pour les groupes électrogènes	830

3° Condenseurs.

Deux condenseurs Worthington de 6.000 *kg* à 7 chevaux	14
d° d° de 1.200 *kg* à 2 chevaux	4
Total pour les condenseurs	18
Total général	**1.332 chevaux.**

CHAPITRE VIII

ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE

L'éclairage de la Tour sera entièrement électrique ; il se divise en trois catégories bien distinctes :

1° L'*éclairage proprement dit* qui comprend l'éclairage de tous les établissements se trouvant sur la Tour, les plates-formes, escaliers, ascenseurs, etc.; à cette catégorie se trouvent aussi rattachés le phare et les projecteurs de la plate-forme supérieure.

2° L'*illumination* qui comprend le décor extérieur de la Tour ; elle en dessine complètement l'ossature au moyen de 4.108 lampes à incandescence de 10 bougies placées dans des réflecteurs en fer-blanc.

3° L'*embrasement* qui est destiné à remplacer les anciens embrasements aux flammes de Bengale. Il sera assuré au moyen de lampes à arc de 30 ampères munies de verres de couleur ; il fonctionnera alternativement avec l'*illumination*.

§ 1. — Éclairage.

L'éclairage proprement dit sera composé de huit circuits principaux provenant des machines.

Le premier circuit comprendra les restaurants Français et Russe.

Le deuxième, les restaurants Anglais et Hollandais.

Le troisième, l'éclairage de la première plate-forme par des lampes à arc.

Le quatrième, les bars, boutiques, escaliers et ascenseurs.

Le cinquième, les bureaux et les kiosques à tickets du sol, le deuxième et le troisième étage.

Les sixième et septième, les projecteurs.

Le huitième, le phare.

L'ensemble formera un total de 1.500 lampes à incandescence de 10 bougies, 20 lampes à arc de 10 ampères et 3 arcs de 100 ampères.

L'incandescence fonctionnera sous 120 volts aux lampes et 130 aux machines; chaque lampe consommera 3,5 watts par bougie; la consommation pour 1.500 lampes sera de :

$$1.500 \times 3{,}5 \times 10 = 54.600 \text{ watts.}$$

A cette consommation, il faut ajouter la perte consentie dans les lignes qui est de 10 volts. La force électro-motrice aux bornes du tableau étant de 130 volts, la perte consentie sera de :

$$\frac{10 \times 100}{120} = 8{,}3 \text{ p. } 100,$$

soit pour les 54.600 watts, 4.352 watts.

Le courant total à fournir sera de :

$$54.600 + 4.532 = 59.132 \text{ watts.}$$

L'éclairage de la première plate-forme par des lampes à arc comprendra 20 arcs de 10 ampères montés par 2 en tension.

Les watts consommés par ce circuit seront de :

$$\left(\frac{20 \times 10}{2}\right) 130 = 13.000 \text{ watts.}$$

Le phare consomme 100 ampères sous 65 volts; le surplus de force électro-motrice disponible sera usé dans une résistance placée au tableau.

Il y aura 2 projecteurs Mangin, l'un de 90 *cm* de diamètre, l'autre de 1,50 *m*.

Comme pour le phare, les lampes seront montées en dérivation, et le surplus de force électro-motrice sera usé dans des résistances.

Il faudra 300 ampères pour alimenter ces 3 appareils à raison de 100 pour le phare, environ 60 pour le projecteur de 0,90 et 140 pour le projecteur de 1,50 *m*.

La consommation en watts sera :

$$300 \times 130 = 39.000 \text{ watts.}$$

La consommation totale de l'éclairage proprement dit sera donc :

$$59.132 + 13.000 + 39.000 = 111.132 \text{ watts.}$$

§ 2. — Illumination.

L'illumination de la Tour sera divisée en 13 circuits d'allumage.

Il y aura 1 circuit par face jusqu'au premier étage, soit 4 circuits.

Le cinquième comprendra le chéneau du premier étage.

Le sixième, les montants de la galerie du premier étage.

Le septième, les cabochons de la galerie du premier étage.

Le huitième, les couronnements des arcades de la galerie du premier étage.

Le neuvième, la partie comprise entre le premier et le deuxième étage.

Le dixième, le chéneau du deuxième étage.

Le onzième, du deuxième étage au panneau 18.

Le douzième, du panneau 18 aux consoles sous le troisième étage.

Le treizième, le sommet.

L'ensemble des circuits comprendra 4.108 lampes de 10 bougies dont la consommation en watts a été fixée par le contrat de M. Beau, entrepreneur général de cet éclairage, à 3,2 watts par bougie.

Ce qui donne un total de $4.108 \times 10 \times 3{,}2 = 131.456$ watts.

La perte consentie en ligne est, comme pour l'éclairage, de 8,3 p. 100.

L'énergie perdue sera de :

$$\frac{131.456 \times 8{,}3}{100} = 10.911 \text{ watts.}$$

La consommation totale sera :

$$131.456 + 10.911 = 142.387 \text{ watts.}$$

§ 3. — Embrasement.

L'embrasement sera assuré par des régulateurs à arc à fût renversé, munis de réflecteurs sphériques en cuivre argenté et de verres de couleur.

Il y aura 6 lampes par pilier au sol, soit 24 lampes.

Autant au premier étage.

16 au deuxième étage.

Et 8 à l'intermédiaire. Soit un total de 72 lampes.

Ces lampes seront de 30 ampères et montées par deux en série.

La dépense totale sera de :

$$\left(\frac{72 \times 30}{2}\right) 130 = 140.400 \text{ watts.}$$

§ 4. — Puissance nécessaire pour alimenter l'installation.

L'illumination et l'embrasement devant fonctionner alternativement, la dépense maxima sera de :

$$111.132 + 142.387 = 253.519 \text{ watts.}$$

Le courant sera fourni par quatre groupes électrogènes composés comme suit :

1° Deux groupes formés chacun d'un moteur Carels de 340 chevaux à triple expansion actionnant, à l'aide d'un accouplement élastique Zodel, une dynamo-multipolaire Sautter de 230.000 watts (type M. 200).

L'ensemble tourne à la vitesse de 325 tours par minute.

2° Deux groupes formés chacun d'un moteur Sautter de 70 chevaux compound actionnant chacun une dynamo de 50.000 watts à 300 tours par minute.

En service normal, une machine Carels et une machine Sautter produisant ensemble

$$230.000 + 50.000 = 280.000 \text{ watts}$$

suffiront à assurer le service.

Les deux autres groupes serviront de rechange.

Ces machines seront réunies en quantité sur les barres d'un tableau de distribution par l'intermédiaire de disjoncteurs coupant automatiquement le circuit en cas d'arrêt intempestif ou de ralentissement d'une machine.

Le tableau portera également tous les appareils de mesure et de distribution pour les différents circuits d'éclairage, d'embrasement et d'illumination.

La force totale, en chevaux-vapeur, disponible dans la salle des machines est de $340 + 70 = 410$ chevaux pour les deux machines fonctionnant simultanément. Il en existe autant comme réserve.

Le nombre de 280.000 watts indiqué pour ces machines donne, à raison de 660 watts par cheval, un nombre sensiblement égal, soit $\frac{280.000}{660} = 425$ chevaux.

En marche normale, on emploiera $\frac{253.519}{660} = 383$ chevaux.

En dehors de ces groupes principaux, on a installé pour l'éclairage pendant le jour et pour les besoins des services un moteur de 10 chevaux actionnant une dynamo Sautter de 8.000 watts, capable d'alimenter environ 200 lampes de 10 bougies à raison de 3,5 watts par bougie.

BIBLIOTHÈQUE NATIONALE
R F

CONCLUSION

BIBLIOTHÈQUE NATIONALE IMPRIMÉS. R F

Nous donnerons en terminant la composition de la Commission de contrôle et de surveillance de la Tour.

Elle se trouve actuellement constituée comme suit :

MM. MASCART. Membre de l'Institut, président.
BOUVARD. Directeur administratif des services d'architecture et des promenades et plantations à la Préfecture de la Seine.
LÉON BRUMAN. Directeur des Affaires départementales et communales au Ministère de l'Intérieur.
LAURENT. Secrétaire général de la Préfecture de police.
DEFRANCE. Directeur administratif des Travaux de la Ville de Paris.
HUET. Inspecteur général des Ponts et Chaussées en retraite, directeur honoraire des Travaux de la Ville de Paris.
BOREUX. Inspecteur général des Ponts et Chaussées, chef des services des promenades de la Ville de Paris.
FORMIGÉ. Architecte des promenades de la Ville de Paris.
COLLIGNON. Inspecteur général des Ponts et Chaussées.
GÉNÉRAL BASSOT. Membre de l'Institut, directeur du service géographique de l'Armée.
HERSENT. Ingénieur civil.
MENANT. Directeur des Affaires municipales à la Préfecture de la Seine.
MOLINOS. Ingénieur civil.
RÉSAL. Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées.
TUR. Ingénieur des Ponts et Chaussées, ingénieur des services techniques de la voie publique.
LE GAVRIAN. Ingénieur des Ponts et Chaussées.

Avant d'achever ce travail, je dois adresser mes remerciements d'abord à mes collaborateurs, tous trois anciens élèves de l'École Centrale :

M. Bourdon pour tout ce qui concerne les dessins, dont la plupart ont été faits d'après des croquis relevés sur place ;

MM. Joseph Monnier et Édouard Allar pour la rédaction du texte.

Et enfin à M. G. Masson, éditeur de l'excellent recueil *la Nature*, qui a bien voulu mettre un grand nombre de ses clichés à ma disposition.

REPRODUCTION

BIBLIOTHÈQUE NATIONALE
R F
IMPRIMÉS

DE

SIGNATURES ET AUTOGRAPHES

BIBLIOTHÈQUE NATIONALE IMPRIMÉS

1 Carnot

2 Olav

Reine Isabelle II d'Espagne

3 Milan — Alexandre

6 A. Prince de Monaco

4 Charles Duque de Braganza

5 Le Grand-Duc Georges Alexandrovitch de Russie.

7

le 23 Octobre 1889.

8 Abbas.

9 Albert Edward

10 Alexandra Princess of Wales — Vienna 10th 1889

11 George.

11 Victoria.

11 Maud.

George Duke of Cambridge August 31st 1889

Le Gd Duc Vladimir de Russie. — Grand Duc Alexandre de Russie.

8 Marie

12 J'y garderai un charmant souvenir de ma visite sous la conduite de l'éminent Constructeur. —

13 Boris

13 Cyrill

11 Marguerite Princesse de Prusse. le 19.II 91

15 Prince Baudouin de Belgique

Le Prince Alexandre d'Oldenbourg

Le Prince Vladimir Dolgoroukow, Gouverneur Général de Moscou.

La Princesse Lise Troubetzkoi

Les Princes Alexis Galitzine

Feodora Princesse. v. Schleswig-Holstein

10 Wilhelm Adolf

L'Hereditaire Prince de Schleswig Holstein

Duc de Lauenbourg.

1. Sadi-Carnot, Président de la République Française. — 2. Georges Ier, Roi de Grèce. — 3. Milan et Alexandre Ier, son Fils, Rois de Serbie. — 4. Charles Ier, Roi de Portugal. — 5. Tzarevitch, Frère du Czar Nicolas II. — 6. Albert Ier, Prince Régnant de Monaco. — 7. Le Duc d'Édimbourg. — 8. Abbas Hilmi II, Khédive. — 9. Le Prince de Galles. — 10. La Princesse de Galles. — 11. Fils et Filles du Prince de Galles. — 12. La Grande Duchesse Wladimir. — 13. Fils du Grand Duc Wladimir. — 14. Sœur de l'Empereur d'Allemagne Guillaume II. — 15. Prince Héritier de la Couronne de Belgique, décédé en 1891. — 16. Frère du Khédive Abbas II.

1 Lockroy

2 Tirard

3 Alphand

4 G Berger

5 Münster

Mte de Gimy

6 Cte d'Ormesson

7 B. Mohrenheim

gal Baron L. de Friedericksz Agent Militaire à l'Ambassade Impériale de Russie

8 Gladstone Sept 7. 1889 June 19/89.

Athènes — Ambassade d'Angleterre. 19 Octobre 1889

Τὸ ὕψος τούτου εὐτυχῶν δικαίωμα νὰ εὐχηθῶ πρὸ ἐμαυτοῦ τὴν ἐπιτυχίαν τῆς ἀδελφίας δόξαν.

Servant de Gennadius Ministre de Grèce à Londres

11 Jules Simon

A. Beernaert Ministre des Finances de Belgique.

Servicio de Navarrete

A. Falcon

Ministre d. l'Instruction Publique

Jos Berry ordi

Praxedes Mateo Sagasta felicita calurosamente á su compatriota Mr Eiffel con motivo de la fausta Empresa

Pierre de Soyres

Conde de Xiquena

11 A. de Mun

Lord D. de Cassyre

On the top!

Mc Tower 12/89. Ch Sumner

Sursum corda Paris 17 de Octubre de 1889 Emilio Castelar

11 G. Hanotaux

11 A Dumas fils

9 E Meissonier

Top Eiffel Tower Sept 10 1889.

To M Eiffel the Engineer. the brave builder of so gigantic and original specimen of modern Engineering from one who has the greatest respect and admiration for all Engineers including the Great Engineer the Bon Dieu

Thomas A Edison

10 J. Fievez Grand Chancelier de Belgique

11 L. M. de Vogüé

Paul Cambon

Jules Cambon

1. M. Lockroy, Ministre du Commerce et Commissaire général de l'Exposition en 1887, signataire de la convention de la Tour. — 2. M. Tirard, Ministre du Commerce et Commissaire général de l'Exposition en 1889. — 3. M. Alphand, Directeur général des Travaux de l'Exposition de 1889. — 4. M. Berger, Directeur général de l'Exploitation de l'Exposition de 1889. — 5. Le Comte de Munster, Ambassadeur d'Allemagne. — 6. Le Comte d'Ormesson, Introducteur des Ambassadeurs en 1889. — 7. Le Baron de Mohrenheim, Ambassadeur de Russie. — 8. Gladstone. — 9. Ernest Meissonnier, Membre de l'Institut. — 10. Général Février. — 11. Membres de l'Académie Française.

Visite de la Commission de la Tour le 7 Novembre 1889

G. Eiffel

1 Ed. Phillips — 1 E. Collignon — 1 E. Mascart — 2 L. Cailletet

1 P. Gondinet — 1 Bouvard — 2 Hautefeuille

1 E. Molinos

J. H. Dilon

On parle toujours fort quand on parle très haut

Blowitz 26/11.89

3 A. Lavalley

Max de Nansouty

A. Scheurer-Kestner sénateur

4 Gal Ch. de Nansouty

Ch. Garnier

Gaston Tissandier

2 J. Massenet

Hommage à Mr Eiffel avec l'expression des souvenirs reconnaissants de la Statue de la Liberté qui lui doit son ossature de fer. A. Bartholdi

2 E. Detaille

2 Jules Claretie

5 Henry Lozé — 6 Poubelle 20 7bre 89 — 7 L. Lépine

8 Mounet-Sully

9 W. F. Cody. Buffalo Bill. U.S.A.

10 威仁親王 Prince Také-hito

Sarah Bernhardt 4 Septembre 1887

10 依仁親王 Prince Yorihito

12 Francisque Sarcey

10 [illegible] & Princesse Yasu-co

11 [Arabic signatures, illegible]

13 Tcheng Ki Tong 陳季同

برهان ابوبكر باجيبوتي

Bourhane Abou-Beker Bey de Djibouti

1 光緒二十二年六月中國頭等工使大學士太子太傅一等伯爵李鴻章來游巴黎謬承外部哈諾都歡宴于巴黎城南之鐵塔第一層樓上憑欄四望全城景物人物俯視渺然據高法天三百尺餘積精堅可期千年不朽洵五大洲之巨觀也西一千八百九十六年七月十七日記時年七十四歲

Traduction

Le 17 Juillet 1896. (22e année, 6e mois du règne de Kouang-Su)

L'Ambassadeur Extraordinaire de Chine, Premier Secrétaire d'État, Premier Tuteur honoraire de l'Héritier présomptif, Comte de première classe, Li Hong-Tchang,

Venu visiter la Capitale Paris, Son Excellence le Ministre des Affaires Étrangères, Monsieur Hanotaux, m'a invité à déjeuner sur la Tour Eiffel située dans la partie sud de la Ville, au premier étage d'où la vue embrasse les quatre points cardinaux.

Vus de cette hauteur les plus hautes maisons et les hommes m'ont paru tout petits. Cette tour, haute de trois cents mètres, construite solide et légère d'aspect, ne saurait être atteinte par mille années des ravages du temps; elle est réellement la plus grande et la plus curieuse merveille des cinq parties du monde.

Fait à l'âge de 74 ans.

Certifié comme autographe, et pour traduction conforme.

[illegible]

Commissaire ordinaire, Secrétaire d'ambassade.

2 [Arabic text, illegible]

La tour Eiffel donne la preuve que l'industrie française est la première du monde.

La tour Eiffel est la chose la plus merveilleuse que l'homme ait édifiée.

3 [Arabic signature, illegible]

4 [Arabic signatures, illegible]

5 [Arabic] Prince Taleb Bey

Prince Mohammed Elkadi

6 [Arabic] Général Ali Zakaria

Le Prince Damrong de Siam

7 [Thai] Chulalonkorn

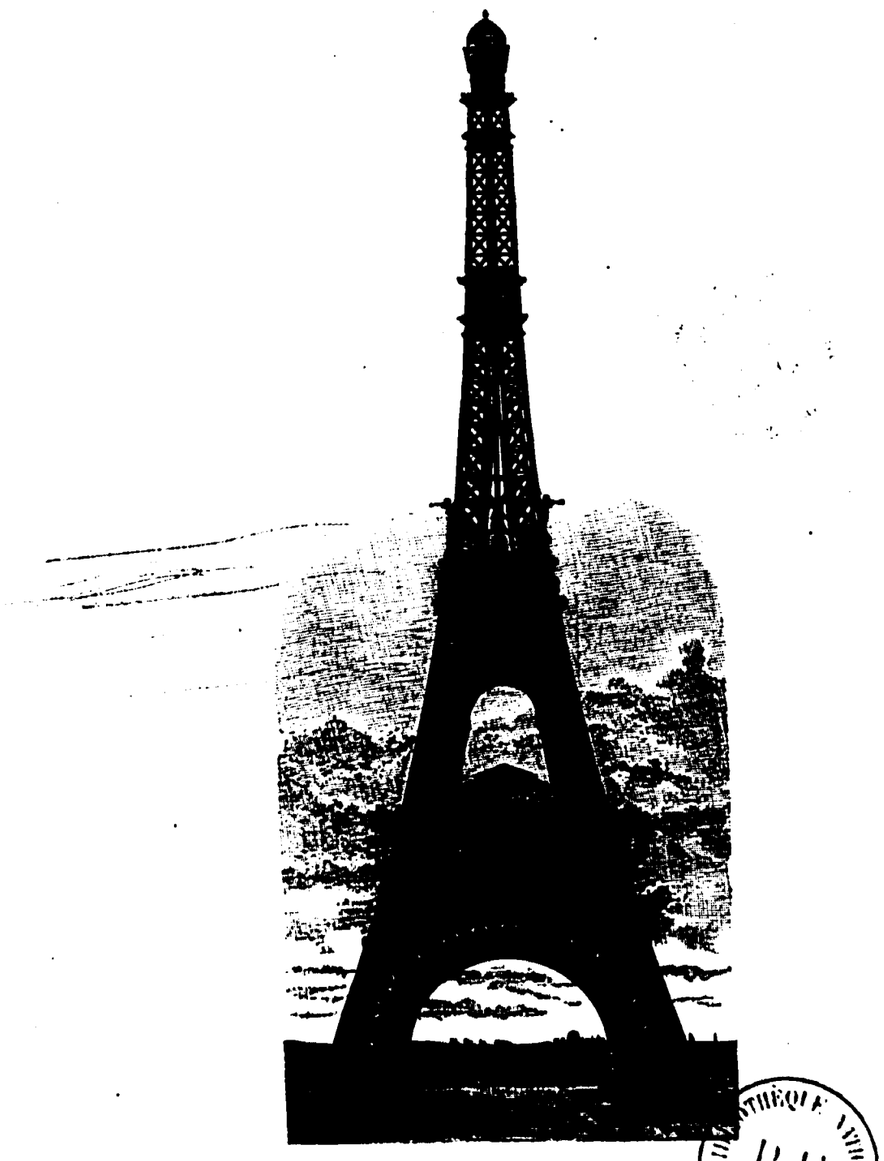
Septembre 12. 1897

[Thai] Mahisra of Siam

[Thai] Major General Phya Scharaja-Teji

8 A. Benghabrit

[Arabic text, illegible]



Premier Projet architectural de la Tour de 300 mètres

APPENDICE

BIBLIOTHÈQUE NATIONALE IMPRIMÉS. R F

NOTICE

SUR LES

TRAVAUX DE M. G. EIFFEL

ET LES

PRINCIPAUX OUVRAGES EXÉCUTÉS PAR SES ÉTABLISSEMENTS

de 1867 à 1890

APPENDICE

TRAVAUX DE M. G. EIFFEL

ET

PRINCIPAUX OUVRAGES EXÉCUTÉS PAR SES ÉTABLISSEMENTS

de 1867 à 1890

BIBLIOTHÈQUE NATIONALE IMPRIMÉS. R F

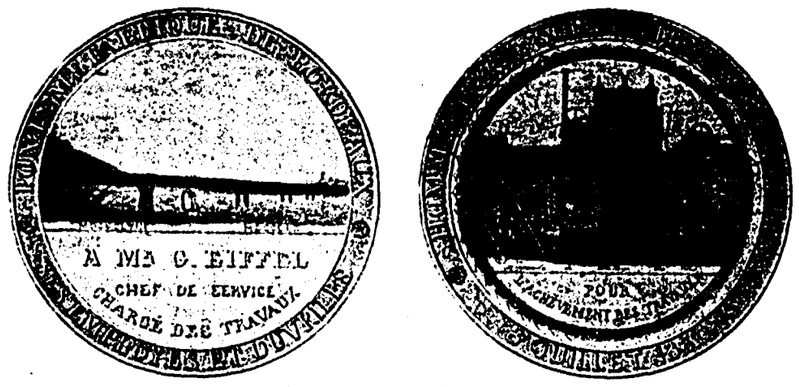


Fig. 1. — Pont de Bordeaux.

(*La plupart des renseignements qui suivent sont extraits de la publication :* « Les Grandes Usines de Turgan »)

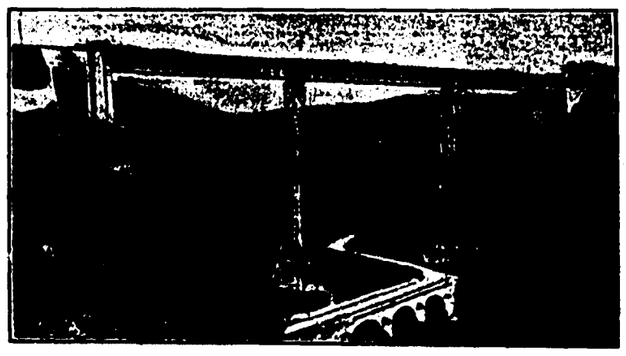


Fig. 2. — Viaduc de la Sioule.

Les grands ouvrages exécutés par M. G. Eiffel en France et à l'étranger, dont la plupart ont été conçus par lui, ont depuis longtemps attiré l'attention générale. En outre du mérite de leur exécution, ils témoignent des importants progrès que cet ingénieur, secondé par les plus distingués collaborateurs, a réalisés dans l'art des constructions métalliques.

Ces progrès se rapportent principalement au mode de construction des piles métalliques de grande hauteur, aux perfectionnements apportés dans les procédés de montage des ponts droits par voie de lançage, à l'emploi rendu courant de la méthode *du porte-à-faux* pour les montages, à l'établissement des grands ponts en arc et enfin à la création de types de ponts portatifs démontables.

M. G. Eiffel, sorti de l'École Centrale des Arts et Manufactures en 1855, eut dès 1858 par la direction des travaux du pont métallique de Bordeaux, l'occasion d'aborder les problèmes de construction dont l'étude et la pratique devaient constituer sa carrière. Ce grand ouvrage fondé sur des piles établies à l'air comprimé, à une profondeur de 25 mètres sous l'eau, présentait l'une des premières applications qui ait été faite de ce procédé, devenu maintenant d'un emploi si général, mais alors peu connu. Cet ouvrage était en même temps l'une des plus importantes constructions en fer établies à cette époque. M. Eiffel fut chargé, comme chef de service de la Société qui avait entrepris ces difficiles travaux, de leur exécution complète et il s'y distingua en les menant à bonne fin.

Lors de l'Exposition universelle de 1867, il fut appelé à collaborer à sa construction, par M. J.-B. Krantz, Directeur des travaux. Sous la direction de ce remarquable ingénieur, pour lequel il avait exécuté d'importants travaux sur la ligne de Brives à Capdenac (réseau central de la Compagnie d'Orléans), il établit le projet des fermes en arc de la Galerie des Machines. Il s'attacha surtout à l'étude théorique de ces arcs et à la vérification expérimentale de ses calculs. Ces belles expériences faites en grand dans les ateliers Gouin avec le concours de M. Tresca, directeur du Conservatoire des Arts et Métiers, et de M. Fouquet, directeur de la maison Gouin, furent consignées dans un Mémoire où, pour la première fois, est déterminée expérimentalement la valeur du module d'élasticité applicable aux pièces composées entrant dans les constructions métalliques. Cette valeur a été trouvée par M. Eiffel de 16×10^8 et est admise depuis d'une manière à peu près générale.

C'est à cette époque de 1867 qu'il fonda son établissement de Levallois-Perret, près Paris. Cet établissement fonctionna comme Société en commandite, de 1868 à 1879, sous le nom d'Eiffel et Cie, puis au nom de M. G. Eiffel seul jusqu'en 1890. Il fut à cette époque transformé en Société anonyme, sous la dénomination de Compagnie des Établissements Eiffel et postérieurement sous celle actuelle : Société de Constructions de Levallois-Perret.

Pendant cette période de 1867 à 1890, M. Eiffel contribua à répandre à l'étranger le bon renom du Génie civil français par les travaux métalliques de toute nature, ponts et charpentes, qu'il exécuta dans ses ateliers de Levallois. Pour indiquer leur importance, sans y comprendre même l'entreprise générale des écluses de Panama, il nous suffira de dire qu'ils représentent un tonnage de plus de 80 millions de kilogrammes de fer, dont la moitié pour ponts de chemins de fer, et un chiffre d'affaires, y compris travaux d'air comprimé, de maçonneries, etc., de plus de 70 millions de francs.

Nous ajouterons que la plupart de ces travaux ont été exécutés par sa Maison sur ses projets, après des concours internationaux où figuraient les premiers ateliers de construction de l'Europe.

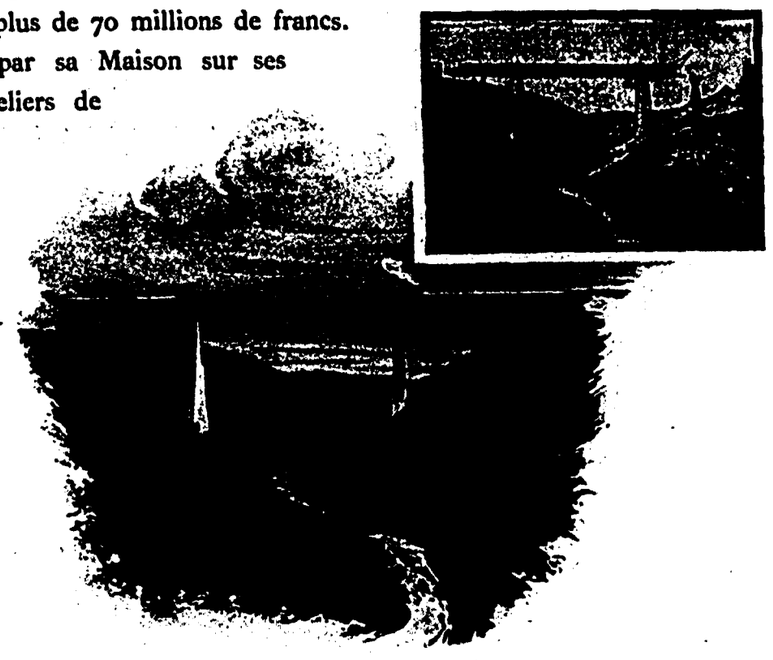


Fig. 3 et 4. — Viaduc de la Tardes.

§ 1. — Piles métalliques.

M. Eiffel fut appelé, en 1868, par M. Nordling, ingénieur de la Compagnie d'Orléans, à présenter des projets pour la construction des viaducs sur piles métalliques de la ligne de Commentry à Gannat, et fut chargé de la construction de deux de ces viaducs, l'un de la *Sioule*, l'autre de *Neuvial*.

Le plus important de ces ouvrages, celui de la *Sioule* (fig. 2), repose sur deux piles métalliques, dont la plus haute a 51 mètres de hauteur. Ces piles sont constituées par des colonnes en fonte réunies par des entretoises en fer. A cette occasion, M. Eiffel imagina, pour la liaison de la fonte et des goussets en fer sur lesquels se fixaient les entretoisements, un mode d'insertion pendant la coulée, qui réussit de la façon la plus complète ; il pratiqua à cet effet dans les goussets des fenêtres à travers lesquelles la fonte, pendant la coulée, venait s'engager dans le gousset et s'assembler avec lui par une série de tenons. Il supprima, par ce procédé, que les ingénieurs estimèrent un sérieux progrès de construction, les difficultés d'ajustage présentées par le mode habituel de liaison.

L'étude de ces piles conduisit M. Eiffel à s'attacher à la construction de piles analogues, mais en substituant le fer à la fonte, afin d'augmenter les garanties de solidité. Le type de piles qu'il a imaginé consiste à former celles-ci par quatre grands caissons, quadrangulaires, ouverts du côté de l'intérieur de la pile et dans lesquels viennent s'insérer de longues barres de contreventement de section carrée, susceptibles de travailler aussi bien à l'extension qu'à la compression, sous les efforts du vent. De cette façon, toutes les parties des piles sont accessibles pour l'entretien et la visite, et leur stabilité générale est accrue dans de grandes proportions.

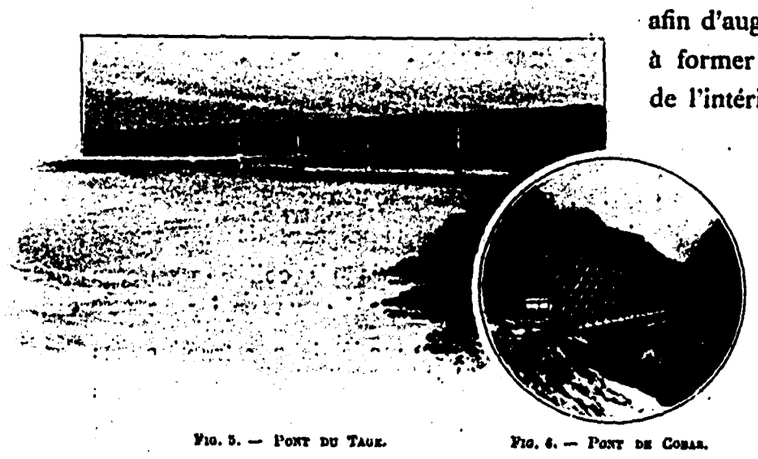


Fig. 5. — Pont du Taur.

Fig. 6. — Pont de Cobar.

C'est ce type qui est devenu courant ; parmi les très nombreux viaducs où M. Eiffel l'a employé et dont il s'était fait en quelque sorte une spécialité, nous ne citerons que les viaducs latéraux du pont du Douro (fig. 17), les grands viaducs de la ligne du Douro, et ceux de la ligne de la Beira-Alta, en Portugal.

Le type définitif de ces piles qui a fait l'objet d'un brevet spécial, se trouve réalisé au *viaduc de Garabit* (fig. 20), avec une hauteur de 61 mètres qui est la plus grande hauteur actuellement atteinte.

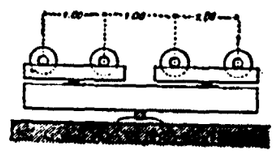


Fig. 8. — Chariot de lançage à bascule à 4 galets.

La rigidité de ces piles est très grande, leur entretien très facile, et leur ensemble a un réel caractère de force et d'élégance. Le système de M. Eiffel, pour ces constructions, paraît ne rien laisser à désirer, et les piles du viaduc de Garabit, notamment, peuvent être considérées comme un modèle pour ces hauteurs.

Pour des hauteurs plus considérables, soit 100 mètres et au-dessus, M. Eiffel a fait breveter un nouveau système de piles sans entretoisements et avec arêtes courbes, qui fournit pour la première fois la solution complète des piles d'une hauteur quelconque.

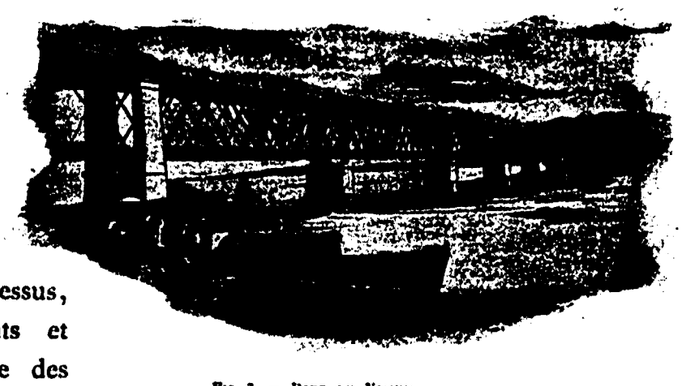


Fig. 7. — Pont de Vianna.

§ 2. — Perfectionnements apportés au lançage des ponts droits.

La construction des viaducs établis sur ces piles métalliques amena M. Eiffel à étudier et à perfectionner les modes de lançage usités jusqu'alors. On sait que l'on entend par *lançage* l'opération par laquelle on pousse dans le vide, jusqu'à la rencontre des piles successives, un tablier qui a été préalablement monté sur le remblai des abords.

M. Eiffel adopta le procédé qui consiste à actionner directement par de grands leviers les galets roulants sur lesquels repose le pont, ce qui supprime toute tendance au renversement des piles et il imagina les *châssis à bascule* destinés à porter ces galets, et dont le type est entré depuis dans la pratique courante. Ces appareils, par leur mobilité autour d'axes horizontaux, permettent aux pressions du tablier de se répartir uniformément sur chacun des galets, de manière qu'aucun des points de la poutre, même avec des surfaces de roulement situées dans des plans différents, ne porte des réactions supérieures à celles que l'on s'est imposées.

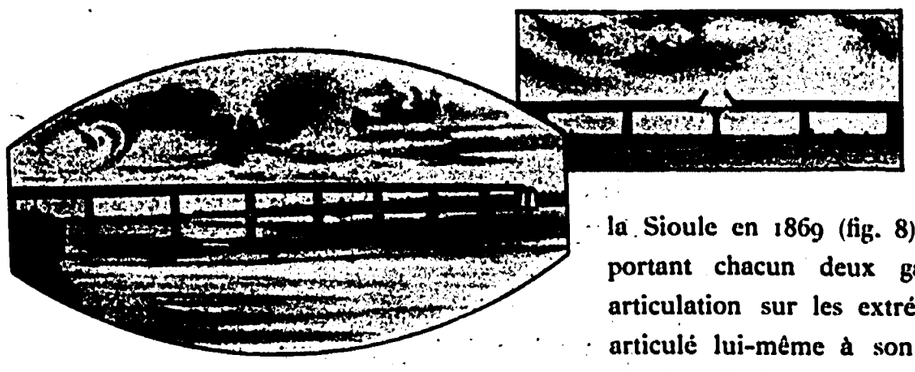


Fig. 10 et 11. — Pont de Cubzac.

Le premier emploi de ces châssis fut fait au viaduc de la Sioule en 1869 (fig. 8). Deux châssis en tolerie portant chacun deux galets reposaient par une articulation sur les extrémités d'un grand châssis articulé lui-même à son centre, de sorte que la réaction de la poutre sur l'appui se trouvait finalement concentrée au milieu de celui-ci et partagée entre les quatre galets de support d'une manière rigoureusement égale.

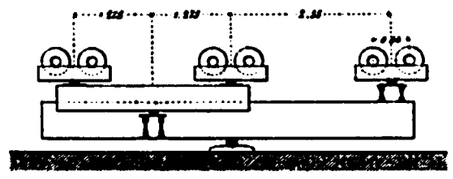


Fig. 9. — Chassis de lançage a bascule a 6 paires de galets.

Leur emploi permit des lançages qui sans lui eussent été absolument impraticables.

Dans la seule pratique de M. Eiffel, nous citerons le pont de la Tardes (ligne de Montluçon à Eygurande) (fig. 3 et 4). Ce viaduc traverse une vallée très profonde et le rail se trouve à 80 mètres au-dessus du fond de la rivière : il est formé par un tablier droit de 250 mètres de longueur en trois travées, dont la travée centrale a 104 mètres d'ouverture. La réaction sur la pile au moment du grand porte-à-faux s'élevait à 700 tonnes et le nombre des galets mis en équilibre par paire sur chaque appui a été jusqu'à 24; on a pu ainsi ne pas dépasser pour chacune des réactions sur la poutre un effort de 29 tonnes. Les galets étaient disposés par rangée de six avec une triple articulation, suivant le croquis ci-contre qui donne le schéma de ce grand appareil (voir fig. 9).

Le tablier lancé de la rive droite ne pouvait être monté en entier par suite du voisinage d'une courbe en tranchée. Quand la partie centrale fut amenée à reposer sur les piles intermédiaires dans la position un peu singulière représentée figure 3, le complément du montage s'effectua en porte-à-faux des piles aux culées, suivant un procédé dont il sera parlé plus loin.

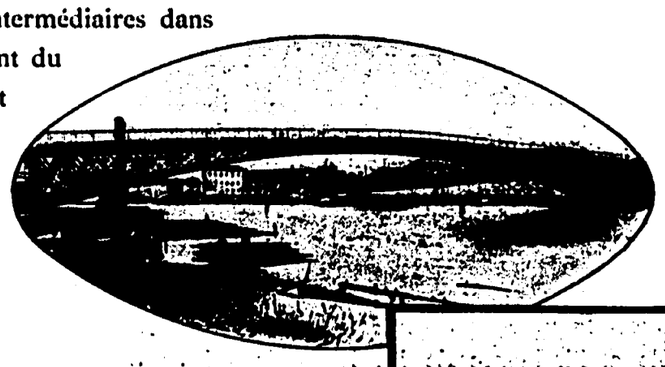


Fig. 12. — Pont des Messageries a Saigon.

Fig. 13. — Pont de Tan-An.

Nous citerons également comme exemple de grands lançages :

1° *Le pont sur le Tage* (fig. 5), ligne de Cacérès. — La longueur du tablier mis en mouvement avait 367 mètres et reposait sur sept piles fondées à l'air comprimé;

2° *Le pont de Vianna* (Portugal) (fig.7), pour route et chemin de fer. — Cet ouvrage, construit d'après le projet de M. Eiffel à la suite d'un Concours international, a une longueur de 736 mètres dont 563 mètres pour le pont principal qui fut lancé d'une seule pièce.

La masse ainsi mise en mouvement était de 1.600.000 kilogrammes, et dépassait le poids des plus grands tabliers mis en place par ce procédé jusqu'à cette époque. Les piles, au nombre de neuf, sont fondées à l'air comprimé, à une profondeur de 25 mètres sous l'étiage;

3° Le nouveau *pont-route de Cubzac* (fig. 10 et 11), sur la Dordogne, construit en 1882, sur l'emplacement de l'ancien pont suspendu. La longueur totale de ce pont est de 552 mètres divisée en huit travées, dont les intermédiaires ont une ouverture de 72,80 *m.*, son poids est de 3.000 tonnes. Ce lançage a présenté les plus grandes difficultés, parce que les piles métalliques en fonte sur lesquelles repose le tablier offraient très peu de stabilité sous les efforts du renversement pendant le lançage, en raison de la forme qui leur avait été donnée par les ingénieurs pour rappeler celles de l'ancien pont.

La difficulté était encore augmentée par la nécessité de lancer le pont en rampe de 0,01 *m.* par mètre. Ce lançage a été effectué à partir de chacune des deux rives pour les trois travées qui y étaient contiguës. Pour les deux travées centrales, la rampe était différente et on dut employer un autre procédé; c'est l'un des exemples les plus frappants d'un nouveau mode de montage que M. Eiffel a été le premier à appliquer en France; nous voulons parler du *montage en porte-à-faux.*

§ 3. — Montage en porte-à-faux.

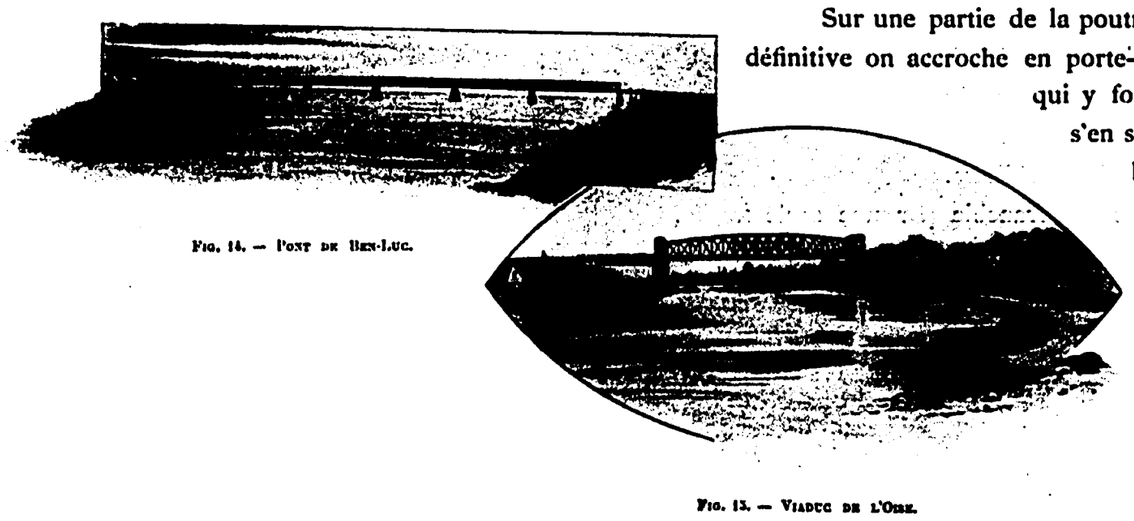


Fig. 14. — Pont de Ben-Luc.

Sur une partie de la poutre du pont déjà construite dans sa position définitive on accroche en porte-à-faux, par un boulonnage, les pièces de fer qui y font suite et, une fois qu'elles sont rivées, on s'en sert comme de nouveaux points d'appui pour boulonner les pièces suivantes. En cheminant ainsi de proche en proche, on arrive à

Fig. 15. — Viaduc de l'Orne.

monter complètement dans le vide les pièces successives de la travée, jusqu'à ce que l'on soit arrivé à l'appui le plus voisin, où à l'aide de verins on relève le pont de la quantité dont il s'était abaissé par la flexion.

Pour le pont de Cubzac on s'avança ainsi d'une longueur de 72,80 *m.* jusqu'à l'axe de la pile centrale où se fit la rencontre des poutres des deux travées montées en porte-à-faux (fig. 10);

4° Un autre mode de lançage à porte-à-faux a été appliqué avec succès au *Pont de Tan-An* (fig. 13), en Cochinchine, pour franchir une travée de 80 mètres, formant l'ouverture centrale d'un pont de 221 mètres de longueur. Le montage de cette travée s'effectua des deux côtés en porte-à-faux et la rencontre se fit dans le vide, vers le milieu de l'ouverture et sans aucun appui intermédiaire. Ce montage différait en cela de celui de Cubzac où la jonction se faisait sur une des piles. Le clavage central se faisait en opérant des rotations convenables autour des appuis.

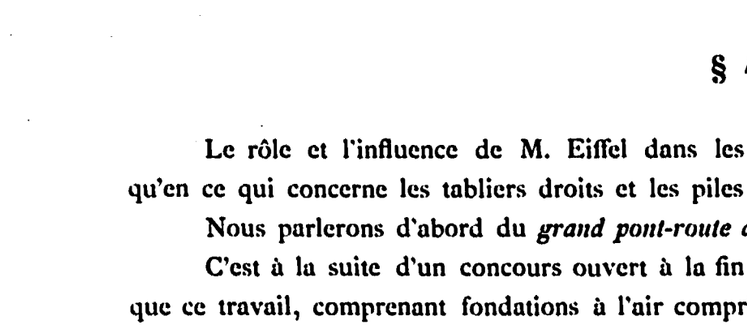


Fig. 16. — Pont de Szegedin.

Cette solution élégante du problème du montage était particulièrement intéressante dans ce cas en raison de la profondeur du fleuve et de la grande rapidité du courant, qui rendaient presque impossible la construction de tout échafaudage.

D'autre part, les piles étaient constituées par un certain nombre de pieux à vis en fonte de près de 30 mètres de hauteur, et sur le sommet desquels il eut été d'une grande imprudence d'essayer une mise en place par voie de lançage, même avec les appareils les plus perfectionnés.

La longueur de cet ouvrage est de 250 mètres et son poids, piles comprises, est de 1.400.000 kilos;

5° Le procédé de montage en porte-à-faux fut également employé au *pont de Ben-Luc* (fig. 14), voisin de celui de Tan-An et situé, comme lui, sur la ligne du chemin de fer de Saïgon à Mytho. Sa longueur est de 516 mètres et il repose sur dix piles en pieux à vis, et quatre en maçonnerie.

Le poids de cet ouvrage, piles comprises, est de 2.100.000 kilos.

Parmi le nombre considérable de ponts droits construits par M. Eiffel, nous mentionnerons :

Le *pont de Cobas* (fig. 6) (ligne des Asturies), qui est intéressant par sa portée de 100,80 *m.* en une seule travée. Il franchit en biais le Sil, par une poutre de 11 mètres de hauteur, dans le milieu de laquelle est placée la voie.

Enfin, le viaduc de l'Oise (fig. 15) (ligne de Mantes à Argenteuil, Compagnie de l'Ouest), dont la portée d'axe en axe des appuis est de 96,50 *m.* Les poutres sont paraboliques, leur hauteur maxima est de 12 mètres : elles sont à 16 mètres au-dessus de la rivière.

§ 4. — Ponts en arc.

Le rôle et l'influence de M. Eiffel dans les procédés de construction des ponts en arc ont été encore plus considérables qu'en ce qui concerne les tabliers droits et les piles métalliques.

Nous parlerons d'abord du *grand pont-route de Szegedin* (Hongrie) (fig. 16).

C'est à la suite d'un concours ouvert à la fin de l'année 1880, entre les principaux constructeurs de France et de l'étranger, que ce travail, comprenant fondations à l'air comprimé, maçonnerie et superstructure métallique, fut confié à M. Eiffel.

Sa longueur totale est de 606,30 *m.;* la travée de navigation est formée par un arc parabolique de 110,30 *m.* de corde avec une flèche de 8,60 *m.* seulement, donnant le surbaissement tout à fait inusité du 1/13.

Les pavillons de péage, les maçonneries des culées et des piles ont été traités dans un style très décoratif et du meilleur goût.

La chaussée a 11 mètres de largeur et est supportée par des montants formant palées, qui s'appuient sur l'extrados des arcs. Ces arcs sont rigides par eux-mêmes, ce qui a permis de supprimer tous croisillons dans les tympans, et de donner à l'ensemble de l'ouvrage un aspect de très grande légèreté.

Le montage de la grande travée a fourni à M. Eiffel une nouvelle occasion d'appliquer ses procédés de montage en porte-à-faux, en supprimant l'échafaudage au droit de la passe réservée à la navigation.

Le prix total de cet ouvrage est de 3.250.000 francs.

Si ces dispositions générales s'éloignaient peu des types connus, il n'en fut pas de même pour le célèbre *pont sur le Douro,* à Porto (voir fig. 17). C'est également à la suite d'un concours international, en 1875, que le projet de la maison Eiffel fut adopté; en voici les traits caractéristiques :

La voie du chemin de fer de Lisbonne à Porto devait franchir le Douro à une hauteur de 61 mètres au-dessus du niveau du fleuve, dont la très grande profondeur à cet endroit rendait impossible la construction de tout appui intermédiaire. La largeur du fleuve (160 mètres) devait donc être franchie par une seule travée.

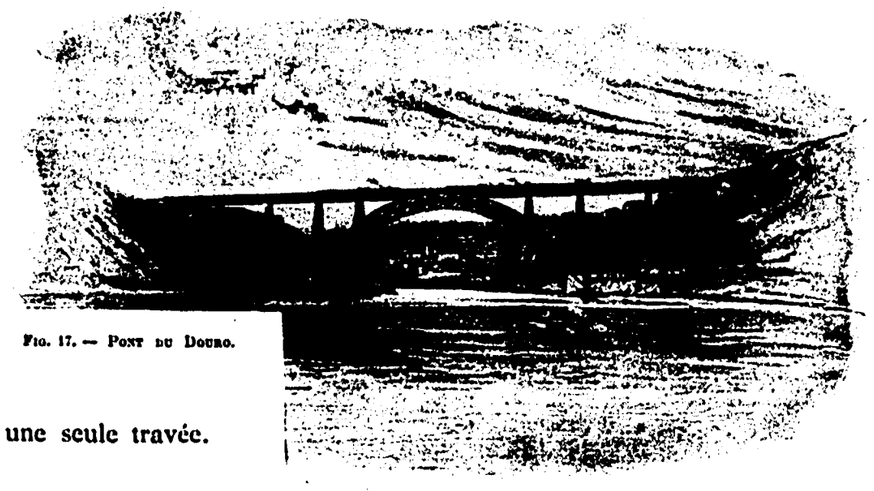


Fig. 17. — Pont du Douro.

M. Eiffel proposa, en conséquence, un projet comportant un arc ayant 42,50 *m.* de flèche moyenne et 160 mètres de corde, destiné à soutenir le tablier droit, lequel, en dehors de l'arc, était supporté par des piles métalliques ordinaires. Cet arc était d'une forme tout à fait spéciale ; il était appuyé sur une simple rotule aux naissances et sa hauteur allait progressivement en augmentant jusqu'au sommet, de manière à affecter la forme d'un croissant. Cette forme est particulièrement favorable pour la résistance à des efforts dissymétriques, parce qu'elle permet de donner de grandes hauteurs dans les parties de l'arc les plus fatiguées.

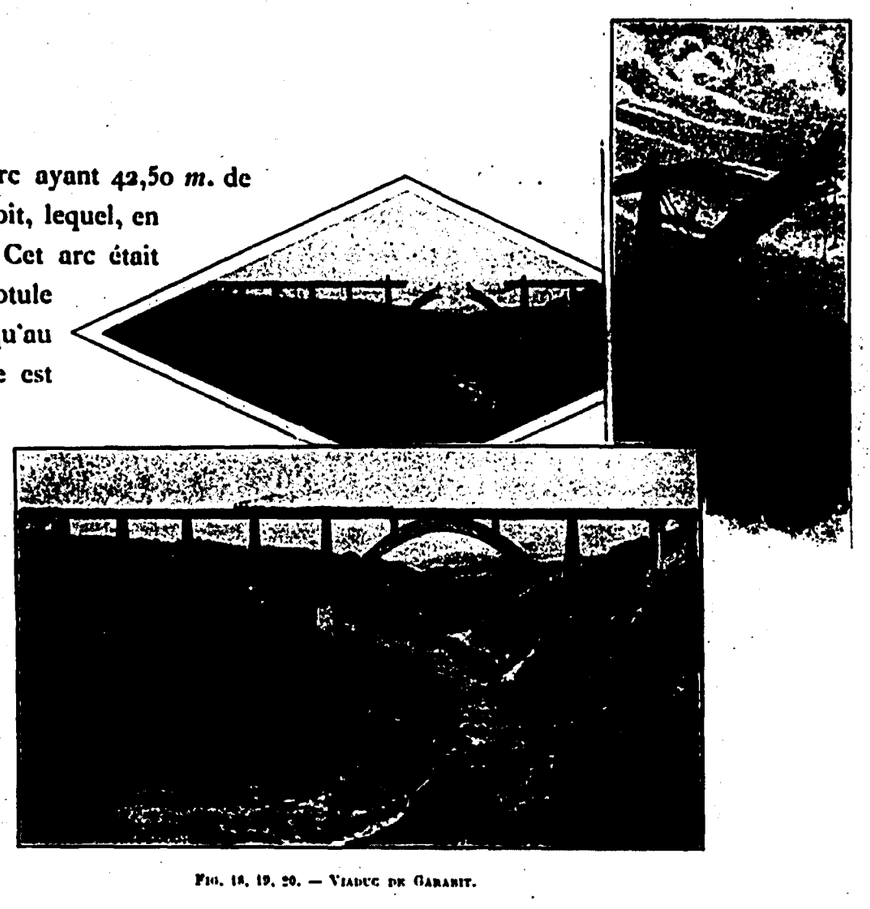


Fig. 18, 19, 20. — Viaduc de Garabit.

Une disposition nouvelle non moins importante a consisté à mettre les deux arcs constituant la travée dans des plans obliques, de manière à donner à la base un écartement de 15 mètres, nécessaire pour la stabilité sous les efforts du vent, tandis que la partie supérieure conservait un écartement de 4 mètres, suffisant pour porter les poutres du viaduc supérieur.

Enfin, une troisième innovation se réalisa dans le montage, qui fut fait tout entier en porte-à-faux et sans échafaudage intermédiaire. A cet effet, les arcs furent construits à partir de chacune des naissances, et soutenus, au fur et à mesure de leur construction, par des câbles en acier qui venaient se fixer au tablier supérieur.

Chacune des parties construites servait de point d'appui pour l'établissement des parties suivantes. Les deux parties d'arc par ces cheminements successifs s'avançaient l'une vers l'autre et venaient se rejoindre dans l'espace, où s'opérait la pose de la clef qui devait les réunir.

Cette opération du montage, aussi difficile que nouvelle, fut couronnée d'un plein succès. La hardiesse du procédé, la grandeur de l'ouverture, qui dépassait celles réalisées jusqu'à ce jour par des ponts autres que des ponts suspendus, fixèrent sur le nom de M. Eiffel l'attention du monde savant de tous les pays.

Aussi fit-on appel à l'habileté de ce constructeur, quand il s'agit d'édifier le grand *viaduc de Garabit* (voir fig. 18, 19, 20) qui devait franchir, à une hauteur de 122 mètres, la vallée de la Truyère, sur la ligne de Marvéjols à Neussargues. Pour donner une idée de cette hauteur de 122 mètres, il nous suffira de dire qu'elle dépasse notablement celle des tours de Notre-Dame de Paris et de la colonne Vendôme superposées.

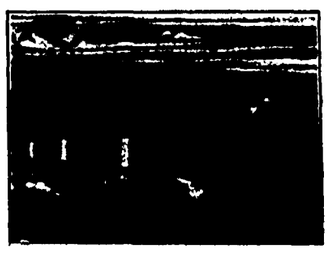


Fig. 21. — Pont de Rach-Lang.

Fig. 22. — Pont de Dono-Nuyen.

Sur la proposition des ingénieurs de l'État, MM. Bauby et Boyer, le Conseil des ponts et chaussées accepta d'établir l'ouvrage sur les données du pont du Douro, et d'en confier la construction, maçonneries et partie métallique, par un traité de gré à gré, à M. Eiffel. Cette résolution, tout exceptionnelle, est ainsi motivée dans la Décision ministérielle du 14 juin 1879.

Pour montrer la possibilité de cet ouvrage et évaluer la dépense, MM. les Ingénieurs se sont adressés à M. G. Eiffel qui a fourni un avant-projet et a déclaré se charger de la construction...

Considérant que le type du pont du Douro étant admis, M. Eiffel, qui l'a conçu et exécuté, est évidemment plus apte que tout autre constructeur à en faire une seconde application en profitant de l'expérience qu'il a acquise dans le premier ; qu'il serait d'ailleurs peu équitable dans l'espèce de confier les travaux à d'autres que M. Eiffel, quand c'est son pont du Douro qui a donné aux ingénieurs l'idée de franchir la vallée de la Truyère par un nouveau tracé dont l'État doit retirer finalement une économie de plusieurs millions...

Que M. Eiffel a appliqué à ces sortes de travaux ses procédés de montage qui ont réussi, grâce à un ensemble de précautions propres à en assurer la précision et dont il possède seul l'expérience : enfin il a inventé des moyens pour obtenir la rigidité des piles et du tablier, contre l'action du vent qui exerce de violents efforts à cette hauteur dans les gorges de montagne.

En ce qui concerne le projet définitif, la Décision ministérielle du 23 juillet 1880, porte :

Les détails des fers ont d'ailleurs été étudiés par M. Eiffel qui en a fourni les dessins et en a justifié les dimensions et les dispositions dans un mémoire contenant des calculs de résistance en renvoyant aux épures qui ont servi aux calculs ou en tiennent lieu...

Les résultats des calculs de M. Eiffel ont été reconnus exacts par M. Boyer.

Le Mémoire de ces calculs a été publié par la Société des Ingénieurs civils en juillet 1888.

La longueur totale du viaduc est de 564 mètres, dont 448 mètres pour la partie métallique. Il repose sur cinq piles, dont la plus haute a 89,64 *m.*, et est formée par un socle en maçonnerie de 25 mètres de largeur et 28,90 *m.* de hauteur; la partie métallique qui le surmonte a 61 mètres.

L'arche principale est *un arc* du type connu maintenant sous le nom d'*arc parabolique système Eiffel.*

Sa corde est de 165 mètres, sa flèche moyenne de 56,86 *m.*, l'épaisseur à la clef est de 10 mètres; l'écartement des têtes

est de 6,28 *m.* à la partie supérieure et de 20 mètres à la base. Sur les reins de cet arc, sont placées deux palées métalliques sur lesquelles, ainsi que sur le sommet de l'arc, repose la poutre du tablier.

Ces dimensions considérables font de cet ouvrage le plus important qui ait été encore construit en France. Le poids du métal qui y entre est de 3.254 tonnes, et son prix, en y comprenant les maçonneries, est de 3.137.000 francs.

Le montage a été fait par des procédés tout à fait analogues à ceux qui avaient si bien réussi au Douro, c'est-à-dire en suspendant chacun des demi-arcs par des câbles en acier fixés au tablier, et en rattachant dans l'espace toutes les pièces les unes aux autres par des montages en porte-à-faux successifs.

Parmi les autres ponts en arc exécutés par la maison Eiffel d'après ses projets, nous citerons encore le pont des Messageries, à Saïgon (ouverture 80 mètres) (voir fig. 12).

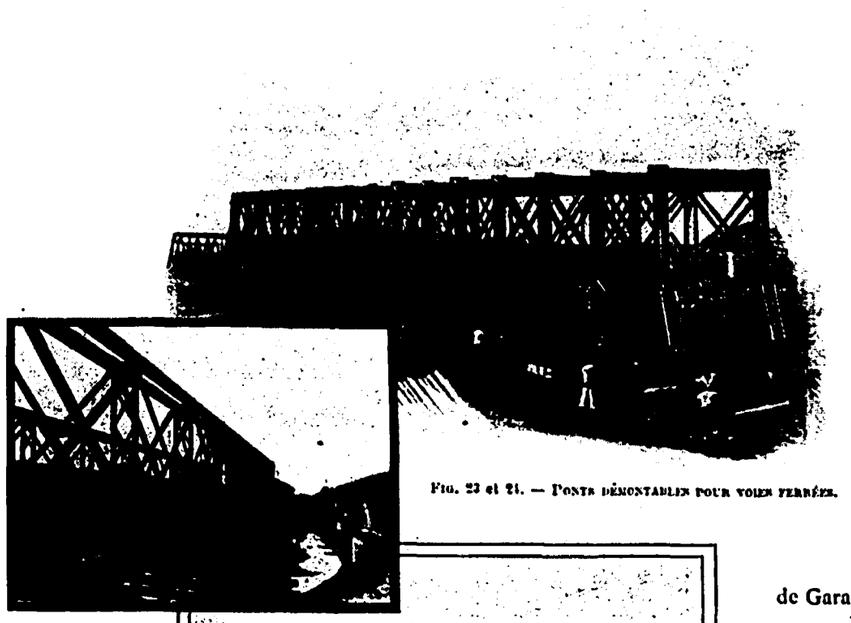


Fig. 23 et 24. — Ponts démontables pour voies ferrées.

Fig. 25. — Ponts militaires.

§ 5. — Ponts portatifs démontables.

Pour donner une idée de ces ponts, qui ont obtenu des *Diplômes d'honneur* à toutes les Expositions auxquelles ils ont figuré, nous ne pouvons mieux faire que de citer quelques extraits du remarquable rapport présenté à la Société d'Encouragement pour l'Industrie nationale, par M. Schlemmer, Inspecteur général des ponts et chaussées, ancien Directeur des chemins de fer.

L'éminent rapporteur s'exprime ainsi :

Parmi les ingénieurs-constructeurs qui ont contribué aux progrès contemporains des constructions métalliques, M. Eiffel occupe l'un des premiers rangs par son viaduc de Garabit, dans le centre de la France, et son grand pont sur le Douro, en Portugal.

Dans la communication qu'il vient de faire à notre Société, il aborde un tout autre ordre d'idées que celui des grandes ouvertures des ponts, pour faire réaliser un nouveau progrès aux constructions métalliques. Il reprend le problème si intéressant et si difficile des ponts portatifs économiques.

La recherche de la construction d'un pont portatif économique, composé d'éléments semblables pour des portées différentes, présente un intérêt considérable.

La solution de ce problème permet de créer un matériel pour les armées en campagne et, plus généralement, de constituer une marchandise que l'on peut approvisionner en magasin et, par suite, tenir à la disposition immédiate des besoins, en substituant à des solutions spéciales à chaque cas particulier une solution générale.

Le problème ne laisse pas de présenter des difficultés.

Il s'agit, en effet, de construire un pont simple, composé de pièces d'un très petit nombre d'échantillons différents, de manière à en faciliter le montage sur place et à permettre de l'effectuer sans avoir recours à des plans de montage et en employant les premiers ouvriers venus.

Il faut que les pièces soient légères individuellement, afin de pouvoir être transportées, sans difficultés, dans les pays les plus dépourvus de chemins. Le pont lui-même, dans son entier, doit être d'un poids très faible, de manière à ne pas nécessiter des supports de fondations dispendieuses et à pouvoir, dans la plupart des cas, être posé simplement sur les berges des deux rives convenablement préparées.

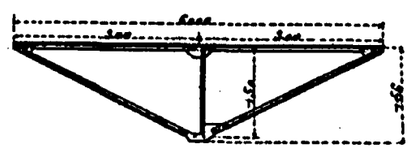


Fig. 26. — Élément triangulaire d'un pont démontable.

L'assemblage des différentes pièces composant le pont doit pouvoir se faire au moyen de boulons, afin d'éviter tout travail de rivetage, qui nécessite un outillage spécial et un personnel expérimenté pour effectuer le montage.

Malgré cela, le pont doit présenter une rigidité comparable à celle des ponts rivés, et ne doit prendre qu'une faible flèche sous le passage des plus lourds chariots.

Enfin, le lançage du pont au-dessus des rivières doit pouvoir se faire rapidement et sans exiger aucune installation spéciale.

C'est dans cet ordre de conditions que M. Eiffel a étudié son système de ponts portatifs, *en acier*, dont un nombre considérable de spécimens sont employés en France et à l'étranger et, notamment, dans nos colonies.

La disposition fondamentale du système consiste à composer les deux poutres garde-corps d'un certain nombre d'éléments triangulaires identiques les uns aux autres, adossés et assemblés entre eux.

Ces éléments (fig. 26) sont des triangles isocèles dont la base, les côtés et le montant sont composés par de simples cornières, qui sont assemblées au moyen de goussets solidement rivés à l'atelier. Chaque élément forme ainsi un ensemble indéformable.

Toutes les cornières composant l'élément sont orientées dans le même sens, c'est-à-dire que les ailes libres de ces cornières sont toutes tournées du même côté. Les éléments offrent donc, sur une face, une surface plane et peuvent, par conséquent, être adossés les uns aux autres, dans le plan médian de la poutre.

Différents types. — Les types les plus employés jusqu'à ce jour peuvent se classer ainsi :

1° Ponts-routes avec platelage en bois (fig. 27) de 3 mètres de largeur jusqu'à 26 mètres de portée, et de 4 mètres de largeur jusqu'à 24 mètres de portée;

2° Ponts-routes à platelage métallique pour chaussée empierrée, de 3 mètres de largeur jusqu'à 24 mètres de portée, et de 3m,80 de largeur jusqu'à 20 mètres de portée;

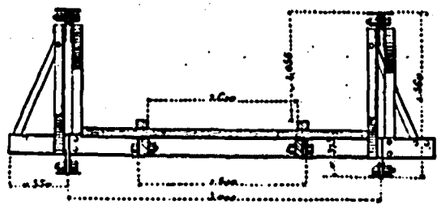


Fig. 27. — Coupe en travers d'un pont-route démontable avec platelage en bois.

3° Ponts militaires pour le passage des troupes et de l'artillerie, de 3 mètres de largeur jusqu'à 24 mètres de portée (voir fig. 25);

4° Ponts pour voies Decauville, jusqu'à 21 mètres de portée;

5° Ponts pour chemins de fer à voie de 1 mètre jusqu'à 22 mètres de portée;

6° Ponts pour le rétablissement des chemins de fer à voie normale, jusqu'à 45 mètres de portée;

7° Passerelles pour piétons et bêtes de somme.

Sans entrer dans la description détaillée de ces types, nous signalerons les applications que la Compagnie d'Orléans vient de faire des ponts de 16 mètres et de 27 mètres, du type n° 6, sur sa ligne de Questembert à Ploërmel, au rétablissement de la

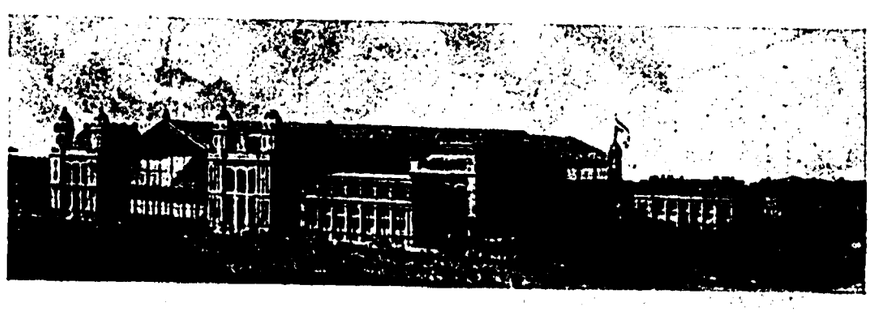


Fig. 28. — Gare de Penth.

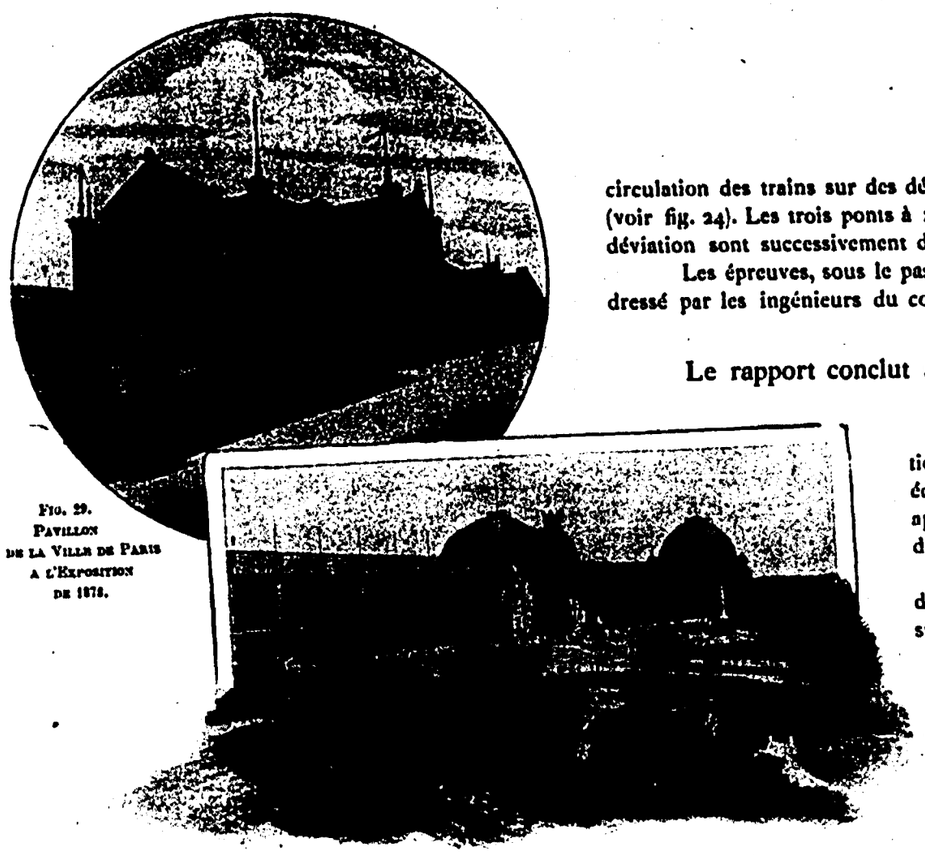


Fig. 29. Pavillon de la Ville de Paris a l'Exposition de 1878.

Fig. 30. — Façade principale de l'Exposition de 1878.

circulation des trains sur des déviations provisoires, pendant la réfection de trois ponts situés sur la rivière d'Oust (voir fig. 24). Les trois ponts à réfectionner étant de la même ouverture, les ponts Eiffel établis sur la première déviation sont successivement démontés et reportés aux deux déviations suivantes.

Les épreuves, sous le passage des trains, ont donné le résultat le plus satisfaisant, constaté par procès-verbal dressé par les ingénieurs du contrôle de la Compagnie d'Orléans.

Le rapport conclut ainsi :

Les développements qui précèdent nous paraissent établir le mérite de la solution que M. Eiffel a trouvée au difficile problème de la construction des ponts portatifs économiques, et de la voie toute nouvelle qu'il a imaginée pour amener de très heureuses applications de l'art des constructions métalliques; c'est incontestablement un progrès dont M. Eiffel nous semble devoir être félicité.

Votre comité des constructions et des beaux-arts n'hésite pas à vous proposer d'adresser à M. Eiffel et à ses collaborateurs des remerciements et des félicitations au sujet de la communication dont il vient d'être rendu compte.

A la suite de ce rapport, la Société d'Encouragement a décerné à M. Eiffel le prix quinquennal Elphège Baude, attribué *à l'auteur des perfectionnements les plus importants au matériel et aux procédés du génie civil des travaux publics et de l'architecture.*

Nous donnons comme exemples de l'application de ces ponts à des rivières de grande largeur :

1° Le pont de Dong-Nhyen (Cochinchine) (voir fig. 22). Ce pont, de 66 mètres de longueur en trois travées, est établi très économiquement; il repose aux extrémités sur deux pieux à vis en fonte noyés dans le remblai, et au-dessus de la rivière sur deux palées formées chacune de quatre pieux à vis en fonte entretoisés — son platelage est en bois;

2° Le pont de Rach-Lang (fig. 21), en trois travées avec chaussée empierrée reposant sur des piles et culées en maçonnerie.

Ces ponts, d'un emploi si commode, ont reçu un nombre considérable d'applications tant en Europe qu'aux Colonies.

En France, le Ministère de la guerre les a adoptés pour le service des armées en campagne. Ils sont également en usage dans les armées Russe, Austro-Hongroise et Italienne.

Le type pour remplacement des voies ferrées va jusqu'à une portée de 45 mètres et a été adopté par les Compagnies P.-L.-M., Est et Orléans, et par le Génie militaire en Italie et en Russie, après de sérieuses études comparatives avec des ponts d'autre système (voir fig. 23).

§ 6. — Édifices publics et particuliers.

La maison Eiffel a construit, en dehors des ponts dont nous n'avons rappelé qu'une faible partie, un grand nombre d'édifices publics et particuliers, tant en France qu'à l'étranger.

Nous mentionnerons seulement :

De nombreuses halles de stations, notamment à Toulouse, Agen, Saint-Sébastien, Santander, Lisbonne, etc.

Des églises, notamment Notre-Dame-des-Champs, Saint-Joseph, le Temple israélite de la place Royale, à Paris, etc.

Des usines à gaz, telles que celles de Clichy, y compris le grand viaduc pour le déchargement des houilles, celles de Rennes et de Vannes, ainsi que celle de la Paz (Bolivie).

Des marchés, tels que celui des Capucins, à Bordeaux.

Des édifices particuliers, tels que l'école Monge, une partie des nouveaux magasins du Bon-Marché, l'hôtel du Crédit Lyonnais, le musée Galliera, le Casino des Sables-d'Olonne, les bâtiments de la douane d'Arica (Pérou), la galerie des Beaux-Arts à l'Exposition de 1867, etc.

Gare de Pesth. — Il y a lieu de s'arrêter sur d'autres constructions plus caractéristiques, notamment *la gare de Pesth* (fig. 28), qui fut, à la suite d'un concours, traitée par la Société autrichienne des chemins de fer de l'État, avec la maison Eiffel comme entrepreneur général, pour une somme à forfait de 2.822.000 francs.

Cette gare, très décorative et d'une très belle construction, couvre une surface de 13.000 mètres, et a été étudiée, dans tous ses détails d'architecture, par le constructeur, sous la direction de M. de Serres, directeur de la Société. Elle est particulièrement intéressante en ce qu'elle présente l'un des premiers types de l'association du métal et de la maçonnerie, et que les éléments de décoration sont principalement formés par les parties métalliques de l'ouvrage, rendues apparentes.

Pavillon de la Ville de Paris. — Un type de construction analogue a été réalisé sous la direction de M. Bouvard, architecte, dans le bâtiment si élégant et si remarqué qui figurait au centre de l'Exposition de 1878 et qui servait à *l'Exposition de la Ville de Paris* (fig. 29).

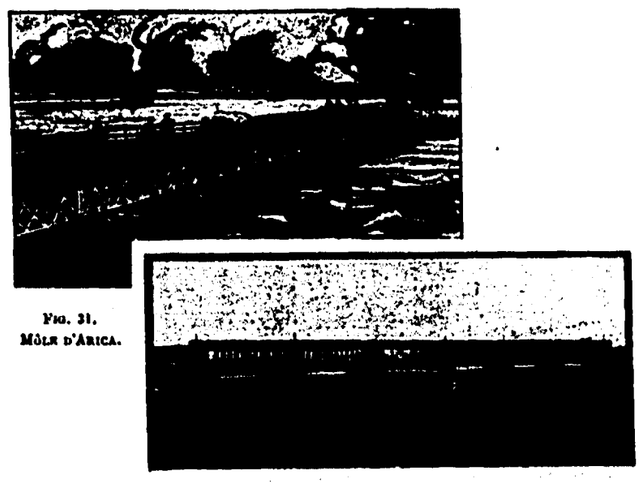


Fig. 31. Môle d'Arica.

Fig. 32. — Barrage de Port-Mort.

Façade principale de l'Exposition de 1878. — Enfin, nous rappellerons que c'est M. Eiffel qui eut l'honneur d'être chargé de la construction de la grande galerie formant *la façade principale de l'Exposition de 1878* (fig. 30). Cette galerie, y compris ses trois dômes de 45 mètres de hauteur, a exigé l'emploi de 3.000 tonnes de métal.

§ 7. — Constructions diverses.

Parmi celles-ci, nous mentionnerons *de nombreuses tours de phares en fer, des jetées à la mer fondées sur pieux à vis,* notamment le môle d'Arica (Pérou) (fig. 31), *l'appontement en Seine de la Compagnie Parisienne du gaz, à Clichy,* fondé sur des piles tubulaires à l'air comprimé.

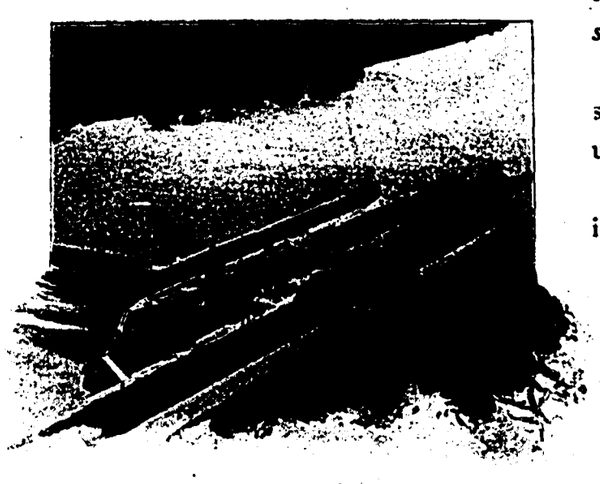


Fig. 33. — Écluse de Port-Villez.

Le barrage de Port-Mort sur la Seine (fig. 32), dont les rideaux (système Caméré) sont maintenus par des armatures de 13 mètres de hauteur, supportées elles-mêmes par un puissant tablier métallique de 204 mètres de longueur et de 12,20 *m.* de largeur.

L'écluse de Port-Villez sur la Seine (fig. 33), dont l'entreprise générale est le plus important travail à l'air comprimé exécuté par la Maison. Cette écluse, de 187 mètres de longueur et de 12 mètres de largeur, est fondée sur des caissons descendus à 13 mètres sous l'eau. Le fonçage des caissons de têtes, qui avaient 21 mètres sur 29 mètres, a présenté les plus grandes difficultés.

Coupole du grand équatorial de Nice (fig. 34, 35, 36). — L'une des constructions les plus intéressantes est *la nouvelle coupole du grand équatorial de l'Observatoire de Nice,* créé par M. Bischoffsheim.

Cette coupole, établie sous la direction de M. Charles Garnier, a un diamètre intérieur de 22,40 *m.*, qui en fait de beaucoup la plus grande de celles qui existent. Elle doit son succès à cette particularité, qu'au lieu de tourner sur des galets, elle est supportée par un flotteur annulaire imaginé par M. Eiffel. Ce flotteur plonge à la façon d'un bateau, dans un réservoir également annulaire, ce qui permet à un enfant de déplacer à la main cette masse considérable de plus de 100.000 kilogrammes. Un système de galets de secours, placé à côté du flotteur, donne la possibilité, en cas de réparation de celui-ci, de faire mouvoir la coupole par le système ordinaire. Il est inutile de dire que le liquide choisi est un liquide incongelable.

La figure 36 représente la vue extérieure de la coupole; on y aperçoit la grande ouverture, de 3,20 *m.* de largeur, destinée aux observations, et pour la fermeture de laquelle M. Eiffel a disposé un système de deux grands volets courbes extérieurs, roulant sur des rails parallèles, à l'aide d'un mécanisme particulier, qui permet une fermeture très rapide.

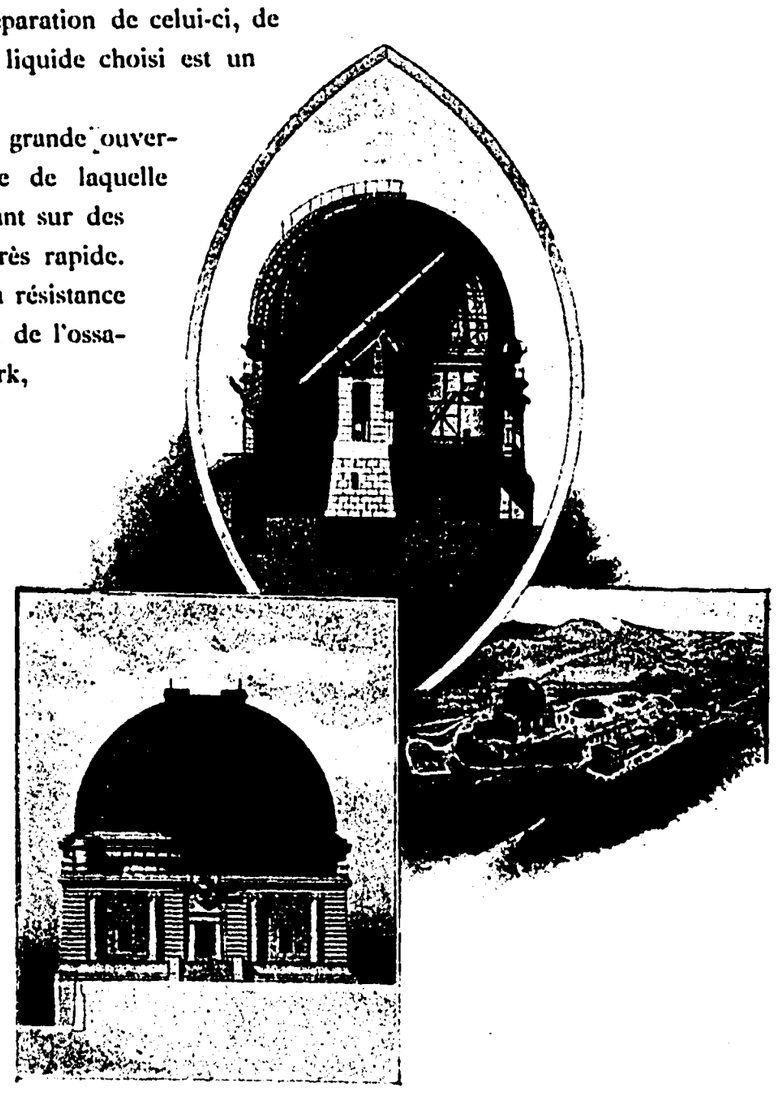


Fig. 34, 35, 36. — Coupole de l'Observatoire de Nice.

Statue de la Liberté (fig. 37). — Les études que M. Eiffel avait faites sur la résistance au vent des constructions métalliques le désignaient à l'avance pour l'établissement de l'ossature en fer de la *statue de la Liberté* de Bartholdi, destinée à la rade de New-York, et dont la hauteur totale est de 46 mètres.

Entreprise générale des écluses du canal de Panama. — Cette entreprise considérable, dont l'importance était de 125 millions, comprenait 10 écluses, qui étaient des ouvrages d'art de dimensions grandioses, en raison surtout de la dénivellation tout à fait inusitée qu'elles comportaient. Cette dénivellation n'était pas moindre en effet de 11 mètres pour 7 d'entre elles et de 8 mètres pour les trois autres. Ces ouvrages étaient entièrement établis sur les projets de M. Eiffel, avec des modes de construction tout à fait nouveaux et permettant d'avoir foi dans le succès. Mais en raison des événements auxquels M. Eiffel a été mêlé, il est nécessaire de ne pas se borner à des renseignements techniques sur cette entreprise.

Suivant l'opinion unanime, la réalisation de l'entreprise des écluses eut assuré l'achèvement du canal de Panama. Or, celle-ci était en pleine et bonne marche, quand en 1888, à la suite de l'insuccès d'une dernière souscription publique, les travaux durent s'arrêter et une liquidation judiciaire se produisit. La résiliation de l'entreprise et le règlement des comptes définitifs qui en fut la conséquence s'opérèrent en 1889 par les soins du Liquidateur, dans une transaction par laquelle décharge pleine et entière était mutuellement donnée.

Tout semblait ainsi terminé quand, en 1892, les passions politiques s'emparèrent de cette affaire et s'y développèrent avec une telle intensité qu'elles bouleversèrent le pays pendant plusieurs années. Des poursuites furent engagées contre MM. de Lesseps, comme administrateurs de la Compagnie, et abusivement on y impliqua M. Eiffel, quoiqu'il ne fût en cette affaire qu'un simple entrepreneur.

En 1893, au mépris de la décharge qui lui avait été donnée en 1889 et par une iniquité qui révolta tous les esprits

réfléchis et les hommes de bonne foi, une condamnation vint frapper M. Eiffel en même temps que MM. de Lesseps.

Mais heureusement pour l'honneur de la justice française, la Cour Suprême intervint, cassa et annula ce jugement *comme violant formellement les dispositions des lois :* de plus, elle établit en fait la parfaite régularité *de la décharge pleine et entière donnée par le Liquidateur en 1889.*

La Compagnie de Panama dut, par suite, abandonner toutes réclamations vis-à-vis de M. Eiffel et lui paya intégralement ce qui lui restait dû. Par contre M. Eiffel, réalisant une offre antérieure, faite longtemps avant tout procès et « considérant comme un devoir moral d'aider autant qu'il le pourrait au relèvement et à la reconstitution de l'œuvre », suivant les termes mêmes de la convention finale, prit une part importante dans la souscription du capital de la nouvelle Société en formation.

Plus tard, à la suite d'une interpellation faite à la Chambre des Députés, M. G. Eiffel fut appelé, comme membre de la Légion d'Honneur, à fournir devant le Conseil de l'Ordre des explications au sujet de la part qu'il avait prise aux travaux du Canal de Panama. Après plusieurs enquêtes minutieuses, le Conseil de l'Ordre prit, en 1895, une délibération par laquelle il fut reconnu qu'aucun fait ne pouvait dans cette affaire être reproché à M. Eiffel.

Voici le texte de cette délibération, telle qu'elle a été notifiée à M. Eiffel :

Paris, le 21 avril 1895.

MONSIEUR,

J'ai soumis au Conseil de l'Ordre, dans sa séance du 6 de ce mois, le travail de la Commission d'enquête que j'avais instituée, et devant laquelle vous avez été appelé, comme membre de la Légion d'Honneur, a fournir des explications au sujet de la part que vous avez prise aux travaux du canal de Panama.

Après avoir pris connaissance du procès-verbal de cette Commission, le Conseil de l'Ordre a adopté les conclusions suivantes :

« Considérant que de l'examen de la conduite de M. Eiffel comme entrepreneur des travaux du « canal de Panama, ainsi que des documents produits, il résulte qu'il n'a commis aucun fait portant « atteinte à l'honneur et de nature à entraîner l'application de peines disciplinaires, le Conseil de l'Ordre « est d'avis qu'il n'y a pas lieu de suivre disciplinairement contre lui. »

Agréez, Monsieur, l'assurance de ma considération distinguée.

Le Grand Chancelier,

GÉNÉRAL FÉVRIER.

Au cours de la même année, à la suite d'un vote de la Chambre, le Conseil de l'Ordre et son Grand Chancelier, le Général Février, estimant que ce vote portait atteinte à l'indépendance de leur jugement, résignèrent leurs fonctions par une lettre que nous reproduisons :

Paris, le 16 juillet 1895.

MONSIEUR LE PRÉSIDENT DE LA RÉPUBLIQUE,

Grand Maître de l'Ordre de la Légion d'Honneur.

La Chambre des Députés, dans sa séance du 13 juillet dernier, a adopté un ordre du jour ainsi conçu :

« La Chambre, regrettant que le Conseil de l'Ordre de la Légion d'Honneur, dans des décisions « récentes, ait tenu si peu compte des arrêts de la Justice, invite le Gouvernement à déposer un projet « de loi réorganisant le Conseil de l'Ordre. »

Accusé d'avoir mal défendu la dignité de la Légion d'Honneur dont il est le gardien vigilant, le Conseil croit devoir présenter au Grand Maître de l'Ordre des observations sur la résolution adoptée par la Chambre des Députés.

Dans l'examen rapide que la Chambre a fait des questions qui avaient donné lieu à une instruction approfondie et à deux délibérations du Conseil, elle ne s'est pas rendu un compte exact de la législation sur la discipline de la Légion d'Honneur, et, faute de connaître l'ensemble des éléments de la question de droit et de la question de fait que soulevait l'affaire de M. Eiffel, elle en a fait une fausse interprétation.

L'auteur de l'interpellation a invoqué l'article 46 du décret du 16 mars 1852, sans apercevoir qu'un arrêt cassé par la Cour de Cassation avait absolument perdu l'autorité de la chose jugée à tous les points de vue et qu'il n'était plus qu'un document à consulter par le Conseil de l'Ordre dans une instruction ouverte en vertu du décret du 14 avril 1874.

Il ne paraît pas avoir su et la Chambre a ignoré que, devant la Cour de Cassation, M. Eiffel ne s'était pas borné à soutenir que la Cour d'Appel de Paris avait fait une fausse application de la loi en matière de prescription, mais qu'il avait aussi demandé la cassation de cet arrêt par le motif qu'il avait violé la loi en assimilant un entrepreneur à un mandataire et en le déclarant, par suite, coupable d'abus de confiance.

La Cour de Cassation n'a pas pu examiner cette seconde partie du pourvoi parce que la question de la prescription passait avant toutes les autres. Mais le Conseil de l'Ordre avait le droit et le devoir d'apprécier à son point de vue les faits retenus par la Cour de Paris et il l'a fait avec la conscience qu'il a toujours apportée dans l'exercice de sa haute juridiction.

Le Conseil croit avoir répondu au grief invoqué dans l'ordre du jour de la Chambre.

Mais nous estimons que ce vote, accepté par le Gouvernement, atteint sans distinction tous les membres du Conseil. Notre devoir est donc, dans les circonstances actuelles, de résigner nos fonctions entre les mains du Président de la République, Grand Maître de l'Ordre, qui appréciera.

Le Conseil était ainsi composé :

Général Février, G. C. ✱, Grand Chancelier de la Légion d'Honneur, *président*; Général Rousseau, G. O. ✱, Secrétaire général de la Légion d'Honneur, *vice-président;* Vice-amiral Thomasset, G. C. ✱, Membre du Conseil de l'Amirauté; Général Charrevron, G. O. ✱; Général Grévy, G. O. ✱; Général Baron de Launay, G. O. ✱; Aucoc, G. O. ✱, Membre de l'Institut, ancien Président au Conseil d'État; Barbier, G. O. ✱, Premier Président honoraire de la Cour de Cassation; Daubrée, G. O. ✱, Membre de l'Institut; Délarbre, G. O. ✱, Conseiller d'État honoraire, ancien Trésorier général des Invalides; Gréard, G. O. ✱, Vice-Recteur de l'Académie de Paris; Janssen, C. ✱, Membre de l'Institut; Meurand, G. O. ✱, Ministre plénipotentiaire honoraire; Tétreau, C. ✱, Président de section au Conseil d'État.

Tels sont, dans toute leur simplicité, les faits positifs que nous avons cru devoir rappeler ici, et qui sont à opposer aux légendes calomnieuses répandues sur le rôle de M. Eiffel dans l'affaire de Panama.

§ 8. — Titres honorifiques.

La longue carrière industrielle que nous venons de résumer valut à M. Eiffel des distinctions de diverses natures.

Il fut nommé :

Président de la Société des Ingénieurs civils en 1889.
Président du Congrès international des procédés de construction à l'Exposition de 1889.
Président de l'Association amicale des anciens élèves de l'École centrale.
Membre du Conseil de perfectionnement de cette École.
Lauréat de l'Institut (Prix Montyon de Mécanique en 1889).
Lauréat de la Société d'Encouragement (prix quinquennal Elphège Baude).

A l'étranger, les Sociétés d'Ingénieurs les plus en renom lui ont décerné le titre de membre honoraire. Nous citerons notamment les Sociétés suivantes :

Institution of Mechanical Engineers de Londres.
American Society of Mechanical Engineers de New-York.
Institut-Royal des Ingénieurs Néerlandais à la Haye.
Société Impériale polytechnique russe.
Association des Ingénieurs industriels de Barcelone.
Association des Ingénieurs sortis des Écoles spéciales de Gand.

A chacune des Expositions de 1878 et de 1889, M. Eiffel obtint un Grand Prix, c'est-à-dire la plus haute des récompenses accordées.

Enfin la liste des décorations décernées à M. Eiffel montre que chacune d'elles correspond à l'exécution d'importants travaux :

Chevalier de la Légion d'Honneur, *à l'ouverture de l'Exposition de* 1878, et Officier en 1889, *à l'inauguration de la Tour.*

Officier de l'Instruction publique (*Exposition de* 1889).

Chevalier de l'Ordre de François-Joseph (*gare de Pest*).

— — de la Couronne de Fer d'Autriche (*pont de Szegedin*).

Commandeur de l'Ordre de la Conception de Portugal (*pont du Douro*).

— — d'Isabelle la Catholique d'Espagne (*pont du Tage*).

— — Royal du Cambodge (*travaux en Cochinchine*).

— — du Dragon de l'Annam (*travaux en Cochinchine*).

— — de la Couronne d'Italie (*ponts démontables*).

— — de Sainte-Anne de Russie (*ponts démontables*).

— — du Sauveur de Grèce (*travaux divers*).

— — de Saint-Sava de Serbie (*travaux divers*).

Les principaux ingénieurs qui ont été les collaborateurs de M. Eiffel dans sa carrière industrielle sont :

MM. H. Lelièvre, T. Seyrig, J.-B. Gobert, Émile Nouguier, Maurice Koechlin, Jules Puig, Charles Loiseau et Adolphe Salles.

G. S.

BIBLIOTHÈQUE NATIONALE IMPRIMÉS.

Fig. 37. — Statue de la Liberté.

ACHEVÉ D'IMPRIMER

PAR

LES IMPRIMERIES LEMERCIER

LE PREMIER JUIN MIL NEUF CENT

BIBLIOTHÈQUE NATIONALE
R.F.